INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Marzo 2015 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

COMPUTACIÓN
Las intrigantes matemáticas de Candy Crush

FÍSICA
Tras el rastro de los axiones

BIOLOGÍA
Mecanismos protectores de la apoptosis

Planetas más acogedores que la Tierra

Nuestra galaxia podría albergar mundos superhabitables mucho más aptos para la vida

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

PLANETAS MÁS ACOGEDORES QUE LA TIERRA | MECANISMOS DE LA APOPTOSIS | TRAS EL RASTRO DE LOS AXIONES

N.° 462

MARZO 2015



6,90 EUROS



Marzo 2015, Número 462



58

NORBERT ROSING, *NATIONAL GEOGRAPHIC*

ARTÍCULOS

MÁS CERCA DE LA CIENCIA
Nuestros lectores ya pueden adentrarse en las fuentes originales de los trabajos que divulgamos. Gracias a un proyecto piloto lanzado por Nature Publishing Group (compañía a la cual pertenece *Investigación y Ciencia*) para promover el acceso de la población a la información científica, siempre que nuestra página web enlace a un artículo publicado en *Nature* (o en otras 48 revistas especializadas del grupo) los lectores podrán leer la versión completa del mismo.



42



84



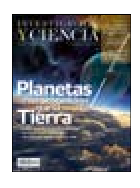
86

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

La vida alienígena podría prosperar en mundos muy diferentes del nuestro. Esta recreación artística muestra la luna de un exoplaneta gigante gaseoso, el cual se alza en el cielo en compañía de otro satélite. El neblinoso mundo, con una masa similar a la terrestre y alimentado por la luz de su estrella, el calor del planeta gigante y un calentamiento interno provocado por las fuerzas de marea, podría ser más acogedor que la Tierra. Ilustración de Ron Miller.



redaccion@investigacionyciencia.es



Octubre 2014

UN MULTIVERSO MATRIOSKA

En «El agujero negro en el origen del tiempo» [Investigación y Ciencia, octubre de 2014], Niayesh Afshordi, Robert B. Mann y Razieh Pourhasan explican que nuestro universo tridimensional pudo haber surgido a partir de la formación de un agujero negro en otro universo mayor, de cuatro dimensiones espaciales. De ser así, ¿no deberíamos esperar que existiesen universos bidimensionales creados por los agujeros negros tridimensionales del nuestro, así como universos de una dimensión a partir de los anteriores? Y después, ¿qué?

R. W. Lowrie
Dade City, Florida

Responde Mann: *En principio, semejante «anidamiento» dimensional podría ocurrir. Sin embargo, no contamos con ningún indicio empírico que apunte a la existencia de tales universos.*

¿SOMOS ESPECIALES?

El número monográfico sobre evolución humana [Investigación y Ciencia, noviembre de 2014], se articula en torno a una pregunta que parte de una premisa falsa: ¿qué nos hace especiales?

El ser humano moderno no representa más que una ramificación minúscula dentro de un arbusto inmenso. Su presencia sobre el planeta apenas se remonta a unos pocos cientos de miles de años; demasiado poco para concluir si la adquisición de un cerebro de gran tamaño constituye o no una estrategia exitosa para garantizar la supervivencia de la especie a largo plazo. Puestos a considerar especial alguna forma de vida, tal vez deberíamos elegir las bacterias, ya que estas aún poblarán el planeta cuando la especie humana no sea más que un remoto recuerdo.

Jeff Schweitzer
Spicewood, Texas

MEDICINA Y EVOLUCIÓN

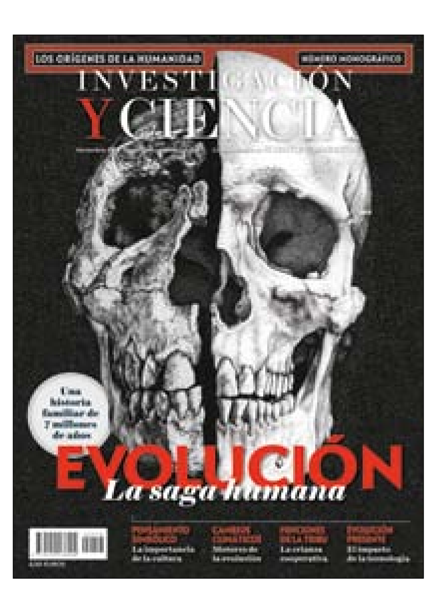
Como señala John Hawks en «El futuro de la evolución humana» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2014], el ser humano continúa evolucionando en la actualidad. Sin embargo, el autor no analiza las consecuencias derivadas de algunos de los factores de presión evolutiva que, durante el último siglo, han cambiado de manera drástica: la medicina y la salud pública. ¿No podría la medicina moderna provocar involuntariamente la supervivencia y la expansión de mutaciones genéticas que, de otro modo, habrían sido eliminadas?

Martin J. Greenwood
Stirling, Australia

Responde Hawks: *Un instante de reflexión sobre la deriva genética y la frecuencia de las mutaciones permite concluir que no tenemos por qué temer que las generaciones futuras sufran de una mayor «debilidad genética» como consecuencia de la medicina moderna y los avances en otros frentes.*

Si se relaja la selección sobre una mutación dañina, su frecuencia solo podrá cambiar por efecto de la deriva genética aleatoria. Y, solo bajo la influencia de esa deriva, la mayoría de las mutaciones poco comunes acabarán extinguiéndose. Puede que unas pocas aumenten su frecuencia, pero la deriva genética procede muy despacio en las poblaciones de gran tamaño. En el caso de la población humana, tendrían que pasar miles de generaciones antes de que una mutación excepcional se convirtiese en común.

Personalmente, no puedo sentirme más que maravillado al ver cómo, en la actualidad, numerosas personas viven felices gracias a nuestra capacidad para controlar trastornos genéticos antaño mortales. Si la medicina y la salud pública pueden garantizar que miles de generaciones futuras se encontrarán a salvo de trastornos semejantes, no veo motivos para preocuparse por la deriva genética.



Noviembre 2014

CURIOSIDAD Y PENSAMIENTO SIMBÓLICO

En «A golpe de suerte» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2014], Ian Tattersall destaca el pensamiento simbólico como uno de los rasgos únicos del ser humano y como uno de los que le habrían permitido adquirir su posición de dominio en el planeta.

Sin embargo, creo que la curiosidad también debería figurar entre las características que nos hacen únicos. De hecho, la capacidad para el pensamiento simbólico serviría de bien poco sin motivación, y esta bien podría haber surgido gracias a la curiosidad.

Leon M. Rosenson

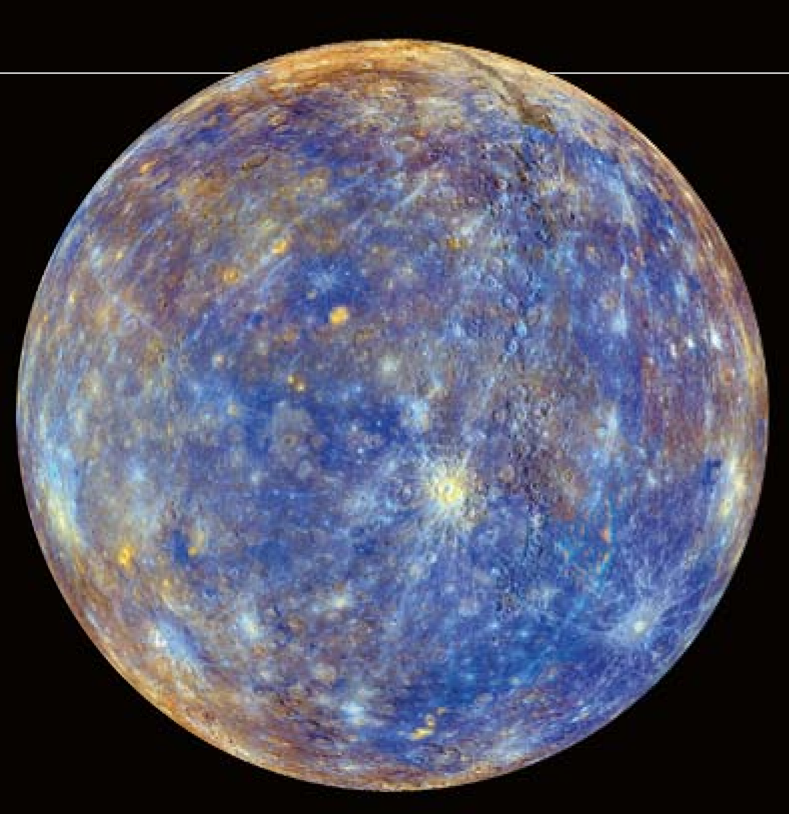
Responde Tattersall: *Tal y como la entendemos hoy, la «curiosidad» humana se encuentra claramente incluida en nuestra capacidad para el pensamiento simbólico, ya que parte de la facultad para imaginar un mundo distinto del que nos revela la experiencia inmediata.*

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



LA MISIÓN EN CIFRAS

8,6
Días mercurianos que la sonda ha estado orbitando alrededor del planeta

1504
Días terrestres que la sonda ha estado orbitando alrededor del planeta

4105
Órbitas completadas

258.095
Fotografías enviadas a la Tierra

14.000.000.000
Kilómetros recorridos

LA SONDA *MESSENGER* es la única que ha cartografiado por completo la superficie de Mercurio (*fotografía*). La imagen, en colores intensificados, refleja las variaciones químicas y minerales a lo largo del planeta. Las zonas ocres corresponden a llanuras formadas por la lava; las azules indican materiales que reflejan poca luz.

EXPLORACIÓN ESPACIAL

Oda al mensajero

La primera misión encargada de poner una nave en órbita alrededor de Mercurio se acerca a su fin. Desde que llegase al planeta más interno del sistema solar, en marzo de 2011, la sonda *MESSENGER* «ha reescrito de arriba abajo lo que sabemos sobre Mercurio y lo que este nos enseña sobre la formación y evolución del sistema solar interior», asegura Sean Solomon, investigador de la Universidad de Columbia y líder de la misión. En un principio estaba previsto que la nave agotase su combustible a finales de este mes, cuando empezaría a caer gradualmente hacia la superficie del planeta. Sin embargo, los ingenieros de la NASA han encontrado una manera de aprovechar sus reservas de helio y emplearlas como propelente durante unas semanas más, lo que podría alargar la misión hasta mediados de abril. Esa prórroga debería bastar para explorar la superficie de Mercurio a menos de 15 kilómetros de altura, una distancia récord. Y, aunque la misión termine, los astrónomos cuentan ahora con más de diez teraoctetos de datos sobre el planeta: información suficiente para mantenerles ocupados unos años.

—Clara Moskowitz

Qué hemos aprendido sobre Mercurio

UN EXTRAÑO CAMPO MAGNÉTICO

En los años setenta, la *Mariner 10* descubrió que Mercurio tenía un campo magnético. Ahora, la sonda *MESSENGER* ha revelado que dicho campo no está centrado en el planeta, sino desplazado hacia el polo norte. Los expertos aún ignoran el origen de esta asimetría.

VULCANISMO

La misión ha zanjado un antiguo debate sobre la intensidad de la actividad volcánica en Mercurio. Las imágenes anteriores mostraban llanuras cuyo origen podía deberse tanto al vulcanismo como al impacto de asteroides. Sin embargo, los datos de la *MESSENGER* concuerdan mejor con lo que cabría esperar de flujos de lava secos y muestran que, de hecho, el material volcánico cubre la mayor parte de la superficie del planeta.

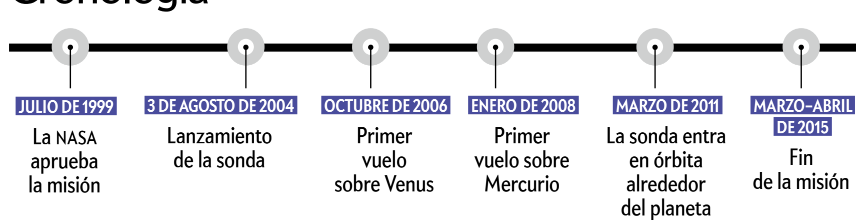
UNA SORPRENDENTE HISTORIA DE FORMACIÓN

Antes se creía que, en sus primeros tiempos, Mercurio había experimentado épocas con temperaturas de hasta 10.000 grados Kelvin, tal vez causadas por el impacto de asteroides. La *MESSENGER* ha refutado esta teoría al detectar en su superficie metales que, a tales temperaturas, se habrían vaporizado.

«HONDONADAS» MISTERIOSAS

La sonda ha descubierto que la superficie del planeta se encuentra salpicada por unas enigmáticas zonas brillantes, llanas y poco profundas. Bautizadas por los científicos como «hondonadas», parecen un tipo de accidente exclusivo de Mercurio. Los expertos creen que podrían formarse cuando algunos materiales volátiles de la superficie escapan hacia el espacio, quizá debido a su interacción con el viento solar.

Cronología



CORTESÍA DE LA NASA, LABORATORIO DE FÍSICA APLICADA DE LA UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS E INSTITUCIÓN CARNEGIE DE WASHINGTON

BIOLOGÍA

Las cucarachas ven en la oscuridad

Las cucarachas podrían inspirar la creación de superhéroes si no fueran tan repulsivas. Algunas especies logran contener la respiración hasta 40 minutos. Otras resisten potentes dosis de radiación, subsisten a base de papel y cola seca, o viven durante semanas sin cabeza. Y a partir de ahora otro superpoder engrosará esta lista: estos insectos nocturnos pueden ver en la oscuridad casi absoluta al agrupar señales lumínicas en el transcurso de cierto tiempo, a semejanza de la fotografía con largo tiempo de exposición.

Físicos de la Universidad de Oulu, donde el frío no permite que estos animales sobrevivan fuera del laboratorio, realizaron experimentos de realidad virtual con una treintena de cucarachas rojas para poner a prueba su visión nocturna. Depositaron cada insecto en una seguibola (*tracking ball*) rodeada por una pantalla esférica y, en condiciones crecientes de oscuridad, proyectaron en la pantalla imágenes de franjas blanquinegras que, por reflejo, incitaron a las cucarachas a caminar hacia ellas.

Los investigadores también insertaron un microelectrodo en uno de los ojos compuestos del insecto, que lo dotan de casi 360 grados de visión, para captar los impulsos eléctricos generados en las células fotorreceptoras por los fotones (partículas lumínicas). En situaciones equivalentes a una noche de luna nueva, el ojo absorbió un fotón cada 10 segundos.

En condiciones normales es imposible ver con tan exigua luz. «Es un número sumamente pequeño de fotones», asegura Matti Weckström, biofísico a cargo de los experimentos. Pero ello no privó de visión a las cucarachas. Teniendo en cuenta el tamaño de las franjas del experimento, las propiedades ópticas del ojo y la cantidad de fotones disponible, el equipo llegó a la conclusión de que el sistema nervioso del insecto retiene la información que le llega de miles de fotorreceptores durante lapsos prolongados; en otras palabras, acumula las señales eléctricas nerviosas y emplea la suma de estas para ver. El equipo dio a conocer sus hallazgos el pasado diciembre en *Journal of Experimental Biology*.

Este fenómeno de retención y agrupación de las señales lumínicas se conocía en muy pocas especies animales, entre ellas una abeja nocturna y un escarabajo pelotero. Si se lograra descubrir el mecanismo, afirma Weckström, tal vez podrían refinarse las técnicas de visión nocturna. De este modo, la repulsiva alimaña se convertiría, si no en un superhéroe, sí en una suerte parecida.

—Rachel Nuwer

ETOLOGÍA

La despensa del cascanueces

Cada año, en las postrimerías del invierno, los pollos del cascanueces común se abren paso a la vida rompiendo el cascarón, prestos a aprender con avidez de sus progenitores la manera de sobrevivir, como el modo de enterrar semillas durante todo el año. El cascanueces destaca entre los pájaros acaparadores porque recolecta las semillas de un solo árbol: el pino cembro de los Alpes y los Cárpatos. Esa exclusividad es mutua, ya que la conífera confía en él para diseminar sus piñones.

El problema estriba en que los piñones solo pueden recolectarse entre agosto y octubre. Si el cascanueces no presta atención, las semillas que entierre germinarán con rapidez y en pocas semanas o meses se convertirán en plantones, con lo que se echará a perder la despensa. Pero un nuevo estudio desvela el eficaz sistema de almacenamiento de este pájaro: elige escondrijos que alargan la conservación de los piñones, en cuyo seno el deterioro es mínimo.

La mayoría de las aves acaparadoras seleccionan con esmero los escondites, aunque nadie sabía exactamente de qué modo. La hipótesis predominante planteaba que escogían con preferencia lugares discretos que no llamaran la atención de posibles saqueadores. Eike Lena Neuschulz, investigadora posdoctoral en el Centro LOEWE de Investigación sobre Biodiversidad y Clima en Fráncfort, puso a prueba esa suposición hace poco. Ella y sus colaboradores ocultaron al azar 900 semillas de pino cembro en puntos de cinco microhábitats en los Alpes suizos orientales, entre otros, bajo el manto de nieve, a los pies de árboles o cerca de arbustos. Después dedicaron casi 400 horas a observar cómo los cascanueces escondían sus propios víveres.



Al comparar los escondrijos experimentales con los de las aves, Neuschulz descubrió que los cascanueces almacenaban a sabiendas los piñones en zonas donde era menos probable que germinasen, lugares muy umbríos o con el suelo seco. El equipo también observó que todas las despensas corrían el mismo riesgo de ser saqueadas, fuere cual fuere el entorno, según los resultados publicados en enero en el *Journal of Animal Ecology*.

«El pino cembro llega a vivir más de 500 años, así que no precisa una tasa de germinación muy alta para asegurar la viabilidad de la especie», aclara Neuschulz. Semejante longevidad explica por qué estos perennifolios confían en pájaros que entierran sus semillas en lugares donde tienen menos posibilidades de germinar: con el paso de los siglos la descendencia será igualmente numerosa, por mucho que cada año apenas germinen unos cuantos. Entretanto, los cascanueces han aprendido a emplear el entorno como un granero en el que conservar por mucho tiempo sus provisiones.

—Jason G. Goldman

WERNER BOLLMANN, GETTY IMAGES (*cucarachas*); RALF HETTLER, GETTY IMAGES (*ave*)



MATERIALES

Vidrio gomoso

El vidrio es resistente... hasta que se rompe. Si se estirase como una goma, podría emplearse para fabricar ventanas irrompibles, pantallas flexibles o sensores mecánicos aptos para soportar las elevadas temperaturas que se dan, por ejemplo, en la aeronáutica. Un grupo de investigadores liderados por Seiji Inaba, del Instituto de Tecnología de Tokio, ha creado el primer vidrio de tales características.

El vidrio ordinario se compone de átomos de silicio y oxígeno fuertemente unidos en estructuras tridimensionales ordenadas pero no cristalinas. Inaba y sus colaboradores han concebido el suyo de modo que la estructura molecular imite la del caucho y otros materiales similares, pues consta de largas cadenas de óxido de fósforo ligadas débilmente. Cuando sometieron el material a altas temperaturas y lo estiraron, sus fibras se contrajeron un 35 por ciento; es decir, mostraron elasticidad, algo nunca antes visto en un vidrio. Los resultados aparecieron publicados el pasado mes de diciembre en la edición en línea de *Nature Materials*.

Inaba, que ahora trabaja para la compañía Ashai Glass, en Yokohama, explica que aún hay aspectos que mejorar. El nuevo vidrio se contrae bien a temperaturas de entre 220 y 250 grados Celsius, pero el objetivo es que lo haga a temperaturas más cercanas a la ambiental. Michael Demkowicz, experto en materiales del Instituto de Tecnología de Massachusetts, señala que la receta de Inaba podría emplearse para, por ejemplo, modificar un vidrio que conduzca bien la electricidad. Tal vez llegue pronto el día en que la caída de un teléfono o una copa ya no suponga una experiencia devastadora.

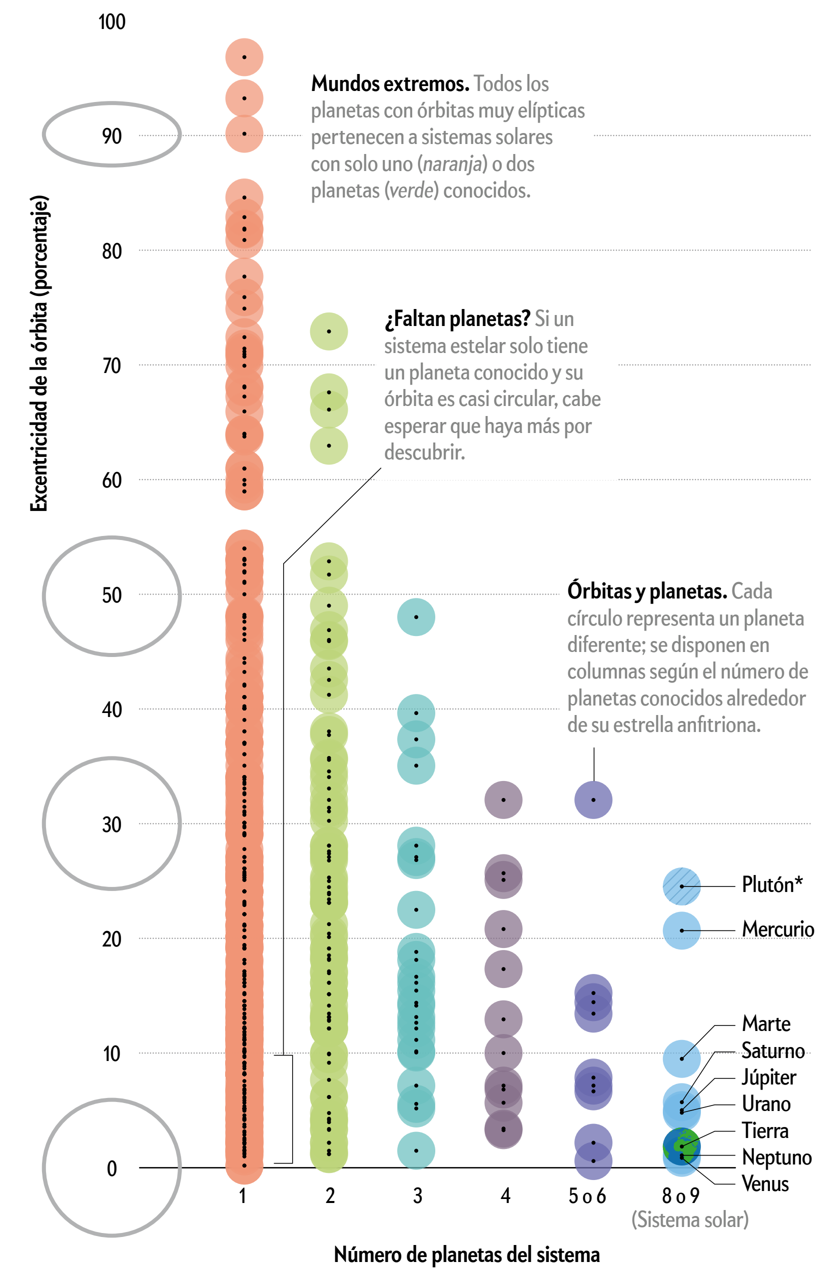
—*Katherine Bourzac*

ASTROBIOLOGÍA

Órbitas planetarias y vida inteligente

Si hay vida compleja fuera de la Tierra, es probable que resida en sistemas estelares con un gran número de planetas. Según un estudio reciente, cuantos más planetas orbitan alrededor de una estrella, más circulares tienden a ser sus órbitas. Y dado que ello implica que su distancia al astro permanece casi constante, su clima sería lo bastante estable para soportar formas de vida avanzadas.

El sistema solar se ajusta a esa pauta. Tiene ocho planetas (o nueve, si incluimos a Plutón) y casi todos ellos describen órbitas bastante circulares. La excentricidad de la órbita terrestre, por ejemplo, se queda en un ínfimo 1,7 por ciento. (En porcentaje, la excentricidad de una órbita vale 0 para una circunferencia perfecta y se aproxima a 100 para una elipse extrema.) Las órbitas de Mercurio y Plutón presentan



TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráfica*); FUENTE: «EXOPLANET ORBITAL ECCENTRICITY: MULTIPLICITY RELATION AND THE SOLAR SYSTEM», MARY ANNE LUMBACH Y EDWIN L. TURNER EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 112, N.º 1, 6 DE ENERO DE 2015



RECREACIÓN ARTÍSTICA de un sistema planetario en sus fases iniciales de formación.

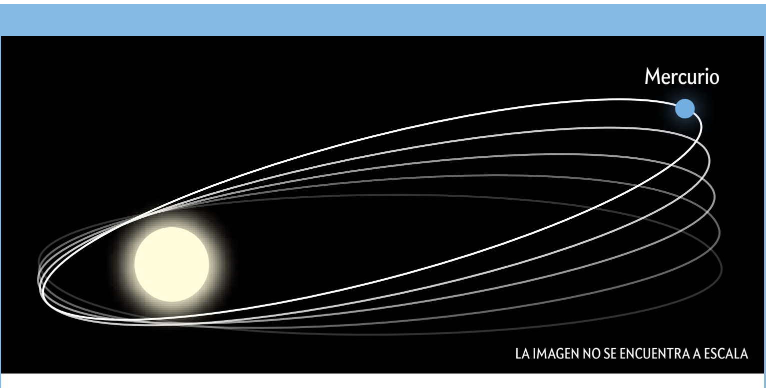
excentricidades del 21 y el 25 por ciento, respectivamente. Pero incluso Plutón —que técnicamente es un planeta enano— parece moderado si lo comparamos con otros exoplanetas, algunos de los cuales tienen excentricidades que superan el 60, el 70 o incluso el 80 por ciento.

Según explican Mary Anne Limbach y Edwin Turner, astrónomos de la Universidad de Princeton y autores del estudio, esos mundos extremos solo se han observado en sistemas con uno o dos planetas. Sin embargo, en aquellos con cuatro planetas o más, estos trazan órbitas mucho más circulares. Este resultado, basado en una estadística de 403 planetas pertenecientes a cientos de sistemas estelares distintos y cuyas excentricidades se habían medido ya antes, apareció publicado el pasado mes de enero en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

Jack Lissauer, planetólogo del Centro de Investigación Ames de la NASA, apunta que la correlación recién descubierta tiene sentido, ya que los planetas que describen órbitas circulares no interfieren demasiado unos con otros. Un planeta con una órbita oblonga, en cambio, puede sembrar fácilmente el caos entre sus vecinos y acabar expulsándolos del entorno.

Tales mundos no se antojan buenas moradas. Al acercarse a su estrella, se abrasan; al alejarse, se hielan. Así pues, parece más fácil que la vida inteligente prospere en un planeta con una órbita circular. De ser el caso, el estudio de Limbach y Turner ha revelado que, al igual que nosotros, esos extraterrestres probablemente verían otros muchos mundos orbitando alrededor de su estrella. Y quizá hasta se tirasen los trastos a la cabeza para decidir cuáles son verdaderos planetas y cuáles no.

—*Ken Croswell*



LA ELIPTICIDAD EN LA HISTORIA

Como cualquier planeta que describe una elipse, Mercurio llega en cada período orbital a un punto de máxima cercanía al Sol. Sin embargo, la posición de ese punto cambia más deprisa de lo predicho por la ley de Newton. Algunos astrónomos del siglo XIX concluyeron que debía haber otro planeta, al que llamaron Vulcano, que desviaba a Mercurio de su curso. En realidad, la proximidad de Mercurio al Sol acentúa los efectos de la relatividad general, un fenómeno que ayudó a confirmar la teoría de Einstein.

NASA/JPL-CALTECH (*sistema planetario*); FUENTE: UNDERSTANDING SCIENCE, HTTP://UNDSCI.BERKELEY.EDU/ARTICLE/HOWSCIENCEWORKS_11; JASON MISCHKA (*elipses Mercurio*); PARQUE DE LAS CIENCIAS DE GRANADA (*riego*)

AGENDA

CONFERENCIAS

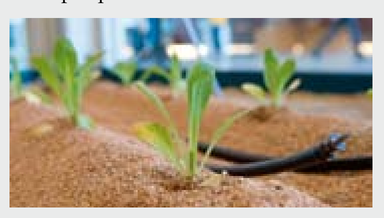
4 de marzo
De grupos de simetría al bosón de Higgs
Teresa Rodrigo, Instituto de Física de Cantabria
Ciclo «Matemáticas en acción»
Aula de la Ciencia
Universidad de Cantabria, Santander
www.unican.es/campus-cultural > Ciencia

7 de marzo
La transición energética: Aspectos económicos y de política efectiva
Jeroen van den Bergh, ICREA e Instituto de Ciencia y Tecnología Ambientales
Ciclo «Los sábados de las ciencias ambientales»
Universidad Autónoma de Barcelona
Bellaterra
www.uab.cat/ciencies-ambientals

19 de marzo
La protección del suelo: Apuntes sobre el estado de la cuestión a escala nacional e internacional
José Luis Arrúe Ugarte, Estación Experimental de Aula Dei (CSIC)
Ciclo «Año Internacional de los Suelos»
Estación Experimental de Aula Dei
Zaragoza
www.eead.csic.es

EXPOSICIONES

Hacia la búsqueda de la reducción de la huella hídrica y energética de los productos agrarios
Parque de las Ciencias, Granada
www.parqueciencias.com



OTROS

14 de marzo – Jornada
Ciclo de la luz
Sant Cugat del Vallès, Barcelona
www.astronomia.cat

Del 16 al 21 de marzo
Semana del Cerebro
Facultad de Medicina, Ciudad Real
www.uclm.es/cr/medicina/BAW/index.html

22 de marzo – Película
Viaje con el Beagle: La selección natural
Museo Marítimo de Barcelona
www.mmb.cat

CALENTAMIENTO GLOBAL

Es hora de abandonar el objetivo de los 2 ºC

La temperatura media global no refleja el estado de salud del planeta. La política climática debería prestar atención a todo un abanico de signos vitales

DAVID G. VICTOR Y CHARLES F. KENNEL

Desde hace casi una década, la diplomacia internacional se ha centrado en mantener el calentamiento global por debajo de los dos grados Celsius con respecto a los valores preindustriales. Esta meta, tan atrevida como fácil de entender, ha sido aceptada sin crítica y se ha demostrado muy influyente.

En lo tocante a la mitigación de emisiones, el quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) se enmarca en la consecución de dicho objetivo. Lo mismo ocurre con casi cualquier política encaminada a reducir las emisiones de carbono, ya sea en California o en la Unión Europea. A finales de este año tendrá lugar en París la 21.ª Conferencia Internacional sobre Cambio Climático; una vez más, con el objetivo declarado de evitar un calentamiento superior a los 2 ºC.

Es hora de que esa osada simplificación se enfrente a la realidad. El objetivo de los 2 ºC está desencaminado tanto política como científicamente. Desde un punto de vista político, ha permitido que algunos Gobiernos finjan tomar cartas en el asunto cuando, en realidad, apenas han hecho nada para atenuar el calentamiento global. Y, para evaluar el impacto humano en el clima desde una perspectiva científica, existen mejores indicadores que la temperatura superficial media, básicamente estancada desde 1998 y muy poco relacionada con nada que Gobiernos o empresas puedan controlar de manera directa.

Esa incapacidad para establecer metas de relevancia científica ha provocado que investigadores y políticos lo tengan difícil a la hora de explicar cómo convertir las inversiones en resultados tangibles. Algunas de las reacciones de los «negacionistas» se han basado, en parte, en la obsesión de los legisladores por la temperatura global y en su falta de reacción ante los verdaderos peligros del cambio climático.

Se requieren nuevos objetivos. Para evaluar nuestra influencia sobre el clima y los peligros que ello entraña, debemos prestar atención a todo un abanico de signos planetarios vitales más enraizados en la ciencia. Tales metas deberían también prestar atención a los muchos gases emitidos por la actividad humana, así como a las políticas encaminadas a reducirlos.

Oportunismo político

La dificultad para articular medidas prácticas quedó patente desde el principio. En 1992, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) expresó la necesidad de prevenir «una interferencia antropogénica peligrosa para el sistema climático». Pero todo intento de esclarecer el significado de «peligroso» se ha mostrado inútil, ya que la ciencia ofrece toda una variedad de respuestas según el sector del clima analizado y cada país mantiene su propia perspectiva.

Las Conferencias de las Partes de la UNFCCC celebradas en 2009 y 2010 en Copenhague y Cancún, respectivamente, reformularon el objetivo en términos de un parámetro más concreto: la temperatura media global. La cifra de 2 ºC se fijó sin demasiada base científica, pero suponía un punto de referencia simple y que ya había surgido en otros foros, como los del IPCC, la Unión Europea y el G8. En aquel momento, los 2 ºC se antojaban una meta concreta y tal vez asequible.

Desde entonces han surgido dos desagradables problemas políticos. Primero, se trata de un objetivo inalcanzable en la práctica. Los intentos de recortar las emisiones globales han fracasado una y otra vez. Y, con un aumento continuo de la concentración de gases de efecto invernadero, antes o después se superará el umbral de los 2 ºC. Una cosa es cierta: los modelos predicen que el calentamiento puede mantenerse por debajo de los 2 ºC si las emisiones se reducen de manera drástica en todo el planeta. Pero tales simulaciones parten de presupuestos heroicos, como una cooperación mundial casi inmediata y la disponibilidad generalizada de ciertas técnicas, como la generación de bioenergía con captura de carbono o algunos métodos de almacenamiento que ni siquiera se ha demostrado que funcionen a gran escala.

Dado que el objetivo de los 2 ºC parece una meta firme y relacionada con el calentamiento futuro, se ha generado la falsa sensación de que los represen-



THINKSTOCK/ANDREA DANTI

tantes políticos están tomando medidas para proteger el clima. Y, al simular que luchan por un fin inalcanzable, se han permitido ignorar la necesidad de una adaptación en masa al cambio climático.

En segundo lugar, el objetivo de los 2 ºC no resulta práctico. Tan solo guarda una relación probabilística con las emisiones y las regulaciones legales, por lo que no se traduce en pautas concretas para Gobiernos ni ciudadanos. En otros ámbitos, aquellos fines que han sabido reformularse en términos de acciones específicas y factibles se han mostrado mucho más efectivos. Por ejemplo, los ocho Objetivos del Milenio, adoptados en el año 2000 por las Naciones Unidas para promover el desarrollo en los países pobres, se tornaron útiles cuando se concretaron en 21 propósitos y 60 indicadores cuantificables, prácticos y ligados a las posibilidades de Gobiernos, ONG y organizaciones humanitarias.

Diagnóstico científico

La meta de los 2 ºC carece de base científica firme. La temperatura media del planeta apenas ha aumentado en los últimos 16 años. Sin embargo, otros datos apuntan a una aceleración del forzamiento radiativo; es decir, la medida en que la acumulación de gases de efecto invernadero está alterando el equilibrio energético del planeta.

Por ejemplo, el Ártico ha experimentado un calentamiento muy rápido, ya que el clima de las latitudes altas es más sensible a las alteraciones climáticas que el del planeta en su conjunto. Y se ha postulado que esa amplificación ártica podría estar causando condiciones meteorológicas extremas en las latitudes medias [*véase* «El comportamiento anómalo de la corriente en chorro», por Jeff Masters; Investigación y Ciencia, febrero de 2015].

¿Cómo es posible que la presión humana sobre el clima aumente cada vez más rápido y que la temperatura superficial media permanezca estable? Casi con total certeza, la respuesta se halla en los océanos. Estos absorben hasta el 93 por ciento de la energía extra añadida al sistema climático, lo que, entre otros efectos, está provocando la subida del nivel del mar.

Sería maravilloso disponer de un solo índice que diese cuenta de todos los riesgos del cambio climático. Pero tal cosa no existe. En su lugar, necesitamos un conjunto de indicadores sobre los distintos efectos de la actividad humana sobre el clima y sus posibles consecuencias. Los médicos llaman «signos vitales» al cuadro de datos relevantes sobre la salud de un paciente. El clima exige una perspectiva similar.

El mejor indicador ha estado presente todo el tiempo: la concentración atmosférica de CO_2 y del resto de los gases de efecto invernadero (o las variaciones en el forzamiento radiativo provocadas por ellos). Hoy, estos parámetros se encuentran bien determinados por una red internacional de estaciones de seguimiento. Ha de acordarse un objetivo mundial para la concentración media en 2030 o 2050. Después, dicha meta debe traducirse en emisiones y planes de acción concretos y actualizados periódicamente, a fin de que cada Gobierno pueda entender con claridad cuánto contribuyen sus medidas al resultado global.

Algunos contaminantes que alteran el clima, como el metano o el hollín, presentan una enorme variabilidad regional y local, y aún persisten grandes incertidumbres sobre la relación entre las emisiones humanas y la concentración registrada. Algunas iniciativas políticas para mejorar la medición y el control de esos agentes están cobrando impulso. Por ejemplo, los países que integran la Coalición Clima y Aire Limpio están intentando reducir las emisiones de sustancias contaminantes de vida corta.

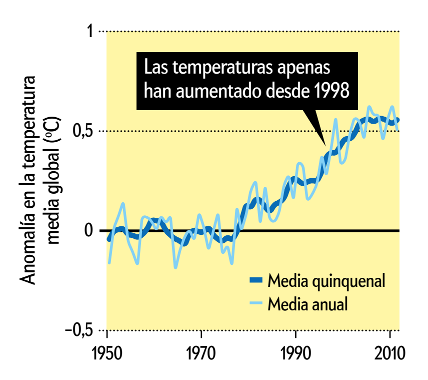
Asimismo, los responsables políticos deberían prestar atención al calor retenido por los océanos y las temperaturas en las latitudes altas. Dado que la energía almacenada en el fondo del mar se liberará a lo largo de décadas o siglos, el calor absorbido por el océano sí constituye un buen indicador del riesgo que, a largo plazo, deberán afrontar las generaciones futuras y el equilibrio ecológico del planeta. Las temperaturas en las latitudes altas, al ser tan sensibles a los cambios en el clima y al generar alteraciones palpables, también deberían considerarse un signo vital planetario.

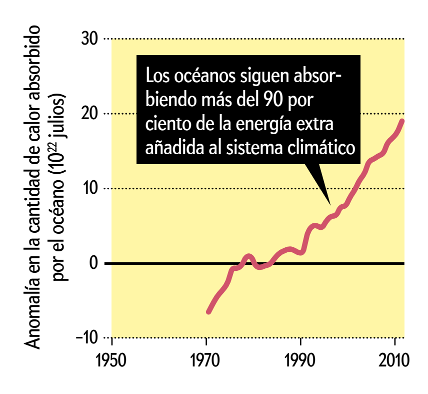
Trazar el camino

En última instancia, necesitamos un «índice de volatilidad» que cuantifique el riesgo creciente de eventos meteorológicos extremos; de esta manera, los signos globales guardarían contacto con los aspectos locales que más preocupan a los ciudadanos. Un buen comienzo sería evaluar la superficie total del planeta que, a lo largo del año, presenta condiciones meteorológicas alejadas en más de tres desviaciones estándar de la media local y estacional.

Hay una ventana de oportunidad. A finales de este año, la conferencia de París intentará alcanzar un nuevo acuerdo mundial en la lucha contra el cambio climático. Toda iniciativa seria deberá discutir los costes que entrañan los objetivos de emisiones propuestos, repartir las cargas y diseñar mecanismos de financiación internacional. Pero los diplomáticos deberán ir más allá de la meta de los 2 ºC. Y, para ello, los científicos habrán de ayudarles a entender por qué tienen que hacerlo y con qué deberían reemplazar dicho objetivo.

Aunque los nuevos indicadores no estarán listos para la cumbre de París, esta debería marcar el camino para establecerlos. Un mandato internacional claro supondría un estímulo para inves-





INTERCAMBIOS DE CALOR: A pesar de que la temperatura media global ha permanecido casi constante durante los últimos 16 años, las aguas oceánicas profundas han experimentado un calentamiento progresivo. En cada caso, las gráficas muestran las desviaciones con respecto a los valores considerados de referencia.

BERKELEY EARTH PROJECT/NOAA

tigar los indicadores de salud de nuestro planeta, del mismo modo que la Cumbre del Milenio de las Naciones Unidas confirió impulso político a los Objetivos del Milenio. El acuerdo que se alcance en París debería incluir la convocatoria de un congreso científico internacional que busque cómo convertir las mediciones climáticas actuales en los signos vitales de mañana.

Los ciudadanos necesitan entender en qué se gasta su dinero. En ese sentido, los términos «concentración de CO_2» o «calor absorbido por los océanos» no resultan tan efectivos como «temperatura» a la hora de explicar a una persona de la calle dónde está el peligro. Sin embargo, todo paciente entiende que, para prevenir enfermedades o prescribir tratamientos, su médico debe prestar atención a un cuadro completo de signos vitales, como la presión sanguínea, el ritmo cardíaco y el índice de masa corporal. Lo mismo ocurre con nuestro planeta.

—David G. Victor
Escuela de Relaciones Internacionales y Estudios del Pacífico
Universidad de California en San Diego
—Charles F. Kennel
Instituto Scripps de Oceanografía
Universidad de California en San Diego

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 514, págs. 30-31, 2014. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014

PARA SABER MÁS

History of the 2 °C climate target. Samuel Randalls en *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 1, n.º 4, págs. 598-605, julio de 2010.
Global warming gridlock: Creating more effective strategies for protecting the planet. D. G. Victor. Cambridge University Press, 2011.
Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content. Magdalena A. Balmaseda, Kevin E. Trenberth y Erland Källén en *Geophysical Research Letters*, vol. 40, n.º 9, págs. 1754-1759, mayo de 2013.

PALEONTOLOGÍA

Los mamíferos más antiguos de la Antártida

Nuevos hallazgos fósiles respaldan la historia biótica y paleogeográfica común de los continentes antártico y sudamericano

JAVIER N. GELFO

En la actualidad, la Antártida, con una superficie algo mayor a la de Europa, constituye el único continente cubierto en su totalidad por glaciares. El clima polar dificulta el desarrollo de la vida tal cual la conocemos en el resto del planeta. De este modo, la muy escasa fauna se halla principalmente asociada a los océanos circundantes, mientras que los vertebrados terrestres, inexistentes desde que los glaciares cubrieron el continente hace unos 40 millones de años, arribaron con el hombre en el siglo xix.



DETALLE DEL MOLAR del mamífero extinto *Notiolofos.*

En el pasado remoto, sin embargo, la posición geográfica de la Antártida, sus relaciones con otros continentes, su clima y, en consecuencia, su biota, conformaban un mundo muy distinto al de hoy, en el que medraban mamíferos terrestres. En un artículo publicado en la revista *Palaeontology*, se ha dado a conocer el registro más antiguo de este grupo en el continente. El descubrimiento aporta una valiosa información sobre la historia evolutiva de los mamíferos, así como nuevas pruebas sobre el momento en que se interrumpió la conexión terrestre entre América del Sur y la Antártida.

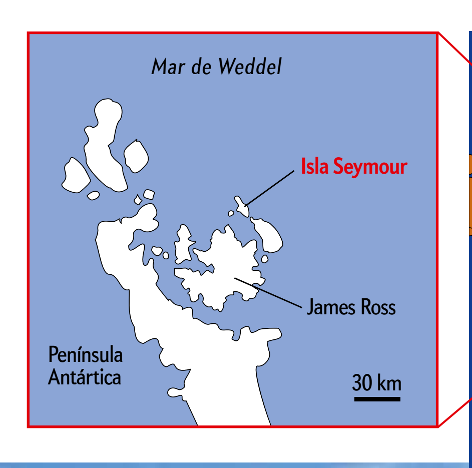
Desde mediados de los años ochenta del siglo xx, el Instituto Antártico Argentino y la Dirección Nacional del Antártico, a través de convenios con el Museo de La Plata, vienen realizando sin interrupción prospecciones paleontológicas en la cuenca de James Ross, al oeste de la península antártica. Estos trabajos, liderados por Marcelo Reguero y un gran número de especialistas, han permitido descubrir restos fósiles de peces, dinosaurios, reptiles marinos, aves y mamíferos. Durante la campaña antártica de verano del 2012-2013 en la isla Seymour, Thomas Mörs, colaborador del Museo de Historia Natural de Suecia, descubrió restos de mamíferos en sedimentos de la Formación La Meseta, datados en 55,3 millones de años (Eoceno temprano). Los materiales corresponden a un diente y una falange de *Notiolofos,* un mamífero placentario de la familia Sparnotheriodontidae (del orden extinto Litopterna). Esta se halla compuesta por un grupo poco numeroso pero con una amplia distribución geográfica, con representantes en sedimentos del Eoceno de São José de Itaboraí en Brasil, y en diversas localidades de Argentina, entre ellas en la provincia de Mendoza y la región patagónica.

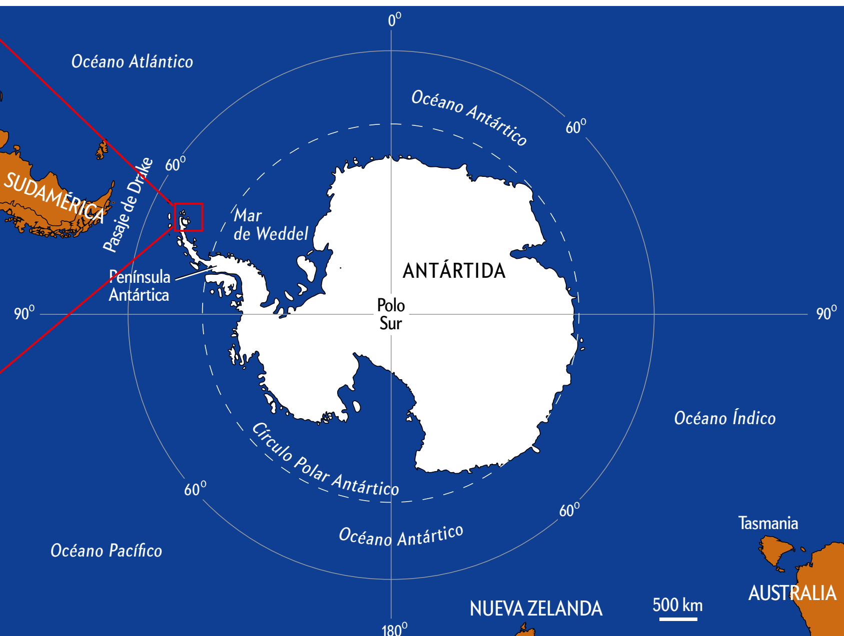
Los elementos descubiertos de la dentición de *Notiolofos* permiten inferir que se trataba de un animal de hábitos herbívoros. Igual que el resto del orden, eran ungulados: apoyaban sus miembros anteriores y posteriores en el extremo de sus dedos, los cuales se hallaban revestidos con una pezuña, similar a la que en la actualidad podemos observar en el tercer y único dedo de los caballos, o en los dedos segundo y cuarto de las vacas.

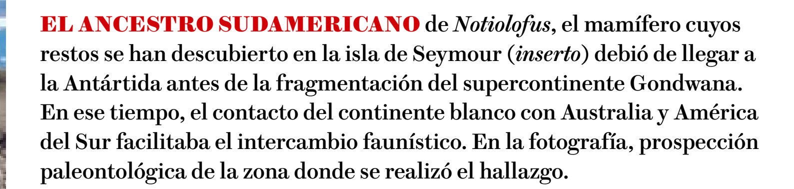
Antes de la división de Gondwana

Tras la extinción de los dinosaurios (a excepción de las aves), hace unos 65 millones de años, el supercontinente Gondwana, que había reunido las masas continentales del hemisferio sur, se estaba fragmentando. El contacto terrestre entre Australia, la Antártida y América del Sur todavía facilitaba el intercambio faunísti-

CORTESÍA DEL AUTOR







EL ANCESTRO SUDAMERICANO de *Notiolofus*, el mamífero cuyos restos se han descubierto en la isla de Seymour (*inserto*) debió de llegar a la Antártida antes de la fragmentación del supercontinente Gondwana. En ese tiempo, el contacto del continente blanco con Australia y América del Sur facilitaba el intercambio faunístico. En la fotografía, prospección paleontológica de la zona donde se realizó el hallazgo.

CORTESÍA DEL AUTOR

co, lo que conllevó una expansión y diversificación de la biota. La asombrosa fauna de mamíferos australianos se conformó en ese entonces, a partir del arribo de diversos grupos de marsupiales sudamericanos que utilizaron la Antártida Occidental como ruta terrestre. Por otra parte, la presencia de fósiles de ornitorrincos (uno de los pocos mamíferos ovíparos con un pico de pato característico y una cola similar a la de un castor) en sedimentos del Paleoceno en Patagonia atestiguan que el flujo migratorio a través de la Antártida fue un fenómeno bidireccional.

En este contexto geográfico, al menos dos grupos de ungulados endémicos de América del Sur, los Astrapotheria y los Litopterna se diversificaron en la Antártida. A principios del Eoceno, el continente blanco presentaba un clima templado y en él prosperaban amplios bosques de «hayas del sur» (del género *Nothofagus*, hoy restringidos a los bosques andinos patagónicos de Argentina y Chile, así como de Oceanía) que favorecieron el desarrollo de un complejo ecosistema terrestre actualmente desaparecido.

El hallazgo de nuevos restos de *Notiolofos* ha permitido ampliar su biocrón (la duración de su existencia), el cual indica que persistió a lo largo de casi 17 millones de años en la Antártida. Esta longevidad evolutiva, poco frecuente entre los mamíferos e incluso entre otros vertebrados, se enmarca en las predicciones de la teoría del equilibrio puntuado, la cual explica la aparición abrupta de nuevas especies en el registro fósil y su posterior estabilidad morfológica a través del tiempo. Corroborar con nuevas pruebas paleontológicas la estabilidad de *Notiolofos* permitirá realizar inferencias sobre el ambiente y el clima del continente antártico durante el Eoceno.

Por otro lado, la historia evolutiva de *Notiolofos*, interpretada a través de sus relaciones filogenéticas, indica que su ancestro sudamericano debió de llegar a la Antártida a través del istmo Weddeliano, un puente terrestre establecido entre ambos continentes. Estudios paleobiogeográficos indican que esta conexión terrestre comenzó a interrumpirse hace unos 56 millones de años (Paleoceno tardío) debido al desarrollo de mares epicontinentales. El aislamiento faunístico y continental se enfatizó con el incremento de la actividad de la placa de Scottia, que separó la península Antártica de América del Sur. Este tectonismo ha sido también responsable de la aparición de corrientes frías y de aguas profundas, la conformación del actual pasaje de Drake y, en consecuencia, el desarrollo de los glaciares antárticos, amenazados hoy día por el calentamiento global.

—Javier N. Gelfo
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
División Paleontología de Vertebrados
Museo de La Plata, Argentina

PARA SABER MÁS

Late Cretaceous/Paleogene West Antarctica terrestrial biota and its intercontinental affinities. M. Reguero et al. Springer, 2013.
The oldest mammals from Antarctica, early Eocene of the La Meseta Formation, Seymour Island. J. Gelfo et al. en *Palaeontology*, DOI: 10.1111/pala.12121, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mamíferos desaparecidos de Sudamérica. John J. Flynn, André R. Wyss y R. Charrier en *IyC*, julio de 2007.
Los primeros mamíferos placentarios. Maureen A. O'Leary en *IyC*, enero de 2015.

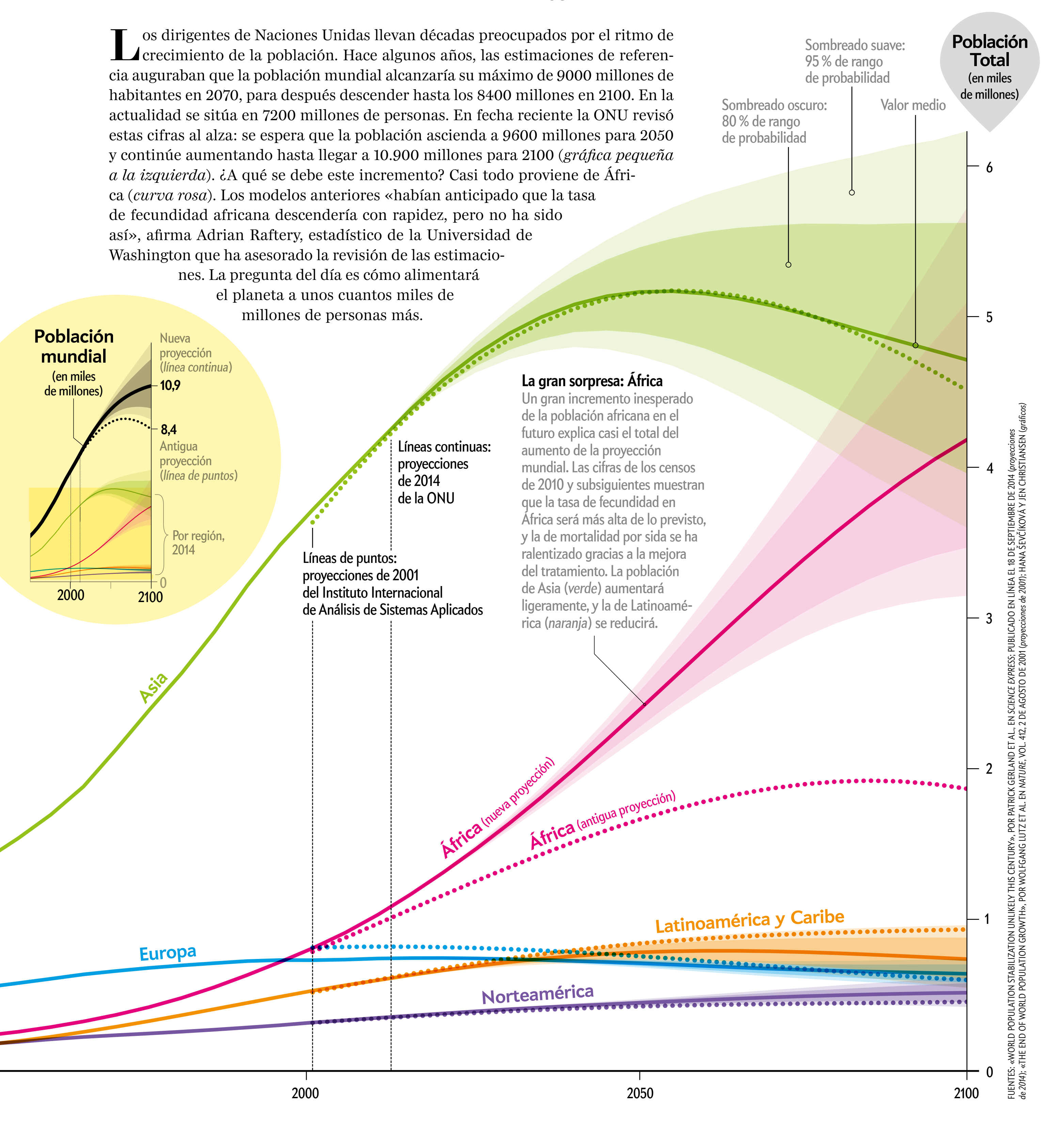
DEMOGRAFÍA

La población mundial crece más de lo previsto

Según las nuevas estimaciones, rozará los 11.000 millones en 2100

MARK FISCHETTI

Los dirigentes de Naciones Unidas llevan décadas preocupados por el ritmo de crecimiento de la población. Hace algunos años, las estimaciones de referencia auguraban que la población mundial alcanzaría su máximo de 9000 millones de habitantes en 2070, para después descender hasta los 8400 millones en 2100. En la actualidad se sitúa en 7200 millones de personas. En fecha reciente la ONU revisó estas cifras al alza: se espera que la población ascienda a 9600 millones para 2050 y continúe aumentando hasta llegar a 10.900 millones para 2100 (*gráfica pequeña a la izquierda*). ¿A qué se debe este incremento? Casi todo proviene de África (*curva rosa*). Los modelos anteriores «habían anticipado que la tasa de fecundidad africana descendería con rapidez, pero no ha sido así», afirma Adrian Raftery, estadístico de la Universidad de Washington que ha asesorado la revisión de las estimaciones. La pregunta del día es cómo alimentará el planeta a unos cuantos miles de millones de personas más.



BIOLOGÍA VEGETAL

Cultivo in vitro de robles y encinas

Las herramientas biotecnológicas permiten la multiplicación y mejora de estas especies forestales

ANA M. VIEITEZ Y ELENA CORREDOIRA

La obtención de plantones de robles y encinas genéticamente diversos y resistentes a las enfermedades está recibiendo cada vez más atención en los programas de restauración forestal, dada la importancia económica y ecológica de estas especies en nuestro país. Sin embargo, los métodos de reproducción y mejora tradicionales aplicados a estos árboles resultan muy poco eficaces para lograr tal propósito debido a las bajas tasas de germinación que presentan las bellotas. En este sentido, las herramientas biotecnológicas disponibles hoy en día, entre las que se incluyen los sistemas de multiplicación de plantas in vitro (micropropagación), revisten un enorme interés. Uno de los avances más destacables ha sido la embriogénesis somática.

La técnica consiste en generar embriones a partir de células somáticas de la planta donante, las cuales se reprograman mediante cambios en su expresión génica para que sigan un patrón de desarrollo similar al del embrión cigótico (el que se origina mediante reproducción sexual). El proceso se basa en la teoría de la totipotencia, propuesta en 1902 por Gottlieb Haberlandt, según la cual «teóricamente, todas las células vegetales son capaces de regenerar una planta completa».

Debido a que la célula de la que se obtiene el embrión no experimenta ni recombinación ni fusión de gametos, la técnica permite conservar íntegramente el genotipo de la planta donante. De ahí que la embriogénesis somática se considere actualmente el método in vitro más eficaz para la multiplicación vegetativa (asexual) de las especies forestales. Tal tipo de reproducción garantiza que toda la carga genética que contiene un árbol seleccionado se mantenga en la descendencia (en el clon), una ventaja que no puede asegurarse por medio de la reproducción sexual.

Los primeros árboles regenerados de modo vegetativo mediante cultivo in vitro se obtuvieron en los años sesenta y setenta del siglo XX utilizando la vía organogénica, la cual se basa en el desarrollo de yemas axilares (las ubicadas en la axila de las hojas) o adventicias (las generadas *de novo* en zonas distintas de las axilares), y el posterior enraizamiento de las plántulas resultantes. Sin embargo, durante los últimos años, la industria forestal ha apostado claramente por la embriogénesis somática debido a su enorme capacidad de multiplicación y a la posibilidad de emplear biorreactores, con los que se logra una mayor producción y calidad de los embriones.

Árboles mejorados y diversos

Las empresas del sector forestal de los países más desarrollados, cuando llevan a cabo plantaciones, utilizan las variedades más productivas, es decir, las obtenidas mediante mejora genética. Sin embargo, se está dando también prioridad a la variabilidad genética para mantener una adecuada diversidad biológica. Ello ha llevado al concepto de silvicultura multivarietal, que implica la plantación de un número apropiado de variedades mejoradas.

La multiplicación mediante embriogénesis somática de las variedades mejoradas facilita la aplicación de la silvicultura multivarietal, ya que permite la producción en masa de plantones óptimos y diversos. Tal estrategia se está llevando a cabo, principalmente, en coníferas. En estas especies, la embriogénesis suele realizarse a partir de material muy juvenil, concretamente de embriones cigóticos. Sin embargo, nosotros consideramos más conveniente iniciar el proceso a partir de material aislado de árboles adultos, cuando estos expresan todo su potencial y valor genético. De este modo, no solo se consigue la propagación clonal de árboles seleccionados, sino que también existe la posibilidad de aplicar en los embriones somáticos técnicas de transformación genética, las cuales permiten mejorar una especie por métodos biotecnológicos.

Uno de los objetivos de nuestra investigación ha consistido en inducir la embriogénesis somática a partir de material adulto del roble europeo común (*Quercus robur*), así como de los robles americanos *Q. rubra*, *Q. alba* y *Q. bicolor*. La mejora genética de estas especies mediante los métodos tradicionales entraña una enorme dificultad debido, fundamentalmente, a la propia biología de las quercíneas. Suelen tardar entre treinta y cuarenta años en alcanzar la madurez sexual y, cuando empiezan a producir semillas, solo lo hacen cada tres o cinco años. La propagación vegetativa (clonal) de árboles seleccionados puede complementarse con la mejora clásica y paliar así los problemas asociados a esta.

Por otro lado, los rodales de roble en todo el mundo sufren la seca, o decaimiento, un síndrome de carácter episódico y progresivo caracterizado por un deterioro y pérdida general de vigor a causa de interacciones complejas y poco conocidas entre factores bióticos y abióticos. Tal afección puede acabar matando los árboles o los hace más vulnerables a las enfermedades ocasionadas por hongos. La obtención de árboles resistentes, o al menos tolerantes, a las enfermedades fúngicas mediante transformación genética es otro de los objetivos de nuestro trabajo.

En colaboración con el grupo de Mariano Toribio, del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario, estamos aplicando la experiencia ganada con estas especies de robles a otras dos especies del mismo género: el alcornoque (*Q. suber*) y la encina (*Q. ilex*). Estos árboles de hoja perenne forman parte de las dehesas, un sistema agroforestal del sudoeste de la península ibérica de una importancia ecológica, social y económica de todos conocida. Ambos están afectados también por la seca, que ocasiona innumerables pérdidas. Con los métodos descritos se podrían atenuar o evitar los efectos del síndrome también en estas especies.

Pasos de la embriogénesis somática

Los últimos logros del proceso embriogénico en diferentes especies del género *Quercus* los hemos publicado en una reciente revisión en *Tree Biotechnology*. La técnica puede dividirse en tres etapas.

REPRODUCCIÓN DEL ROBLE EN EL LABORATORIO

La embriogénesis somática de robles y encinas permite la reproducción vegetativa (asexual) in vitro de árboles de características deseadas. A partir de los brotes con hojas de un árbol adulto seleccionado se obtienen embriones somáticos (originados de tejidos diferenciados), que dan lugar a plantones con el mismo genoma y rasgos morfológicos que el árbol original. La técnica ofrece la posibilidad de mejorar la especie (por ejemplo, aumentar su resistencia a las enfermedades fúngicas) a través del proceso de transformación genética, así como crear un banco de embriones de individuos de especial interés para la conservación. Las siguientes imágenes ilustran las etapas del proceso.



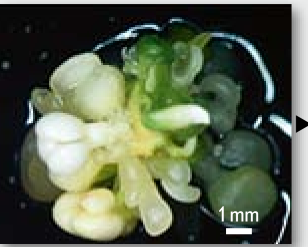
1 Se obtiene un brote con hojas de una rama de roble adulto.



2 Las hojas se disponen en placas de Petri y se cultivan in vitro con sustancias reguladoras del crecimiento.



3 Al cabo de unas semanas se desarrolla un embrión somático.



4 A continuación, se hace multiplicar el embrión en condiciones controladas (embriogénesis secundaria), con lo que se obtienen numerosos embriones idénticos.



5 Se hacen madurar y germinar los embriones, los cuales dan lugar a los plantones destinados a las plantaciones.

La primera es la inducción embriogénica, esto es, la obtención de los embriones. Para ello seleccionamos árboles adultos (algunos de más de 300 años) pertenecientes a rodales de reproducción (destinados a la obtención de semillas) en las provincias de Pontevedra y Orense. Se usaron hojas en expansión procedentes de brotes de esos árboles, bien de brotes previamente establecidos y multiplicados in vitro, o bien de brotes epicórmicos (los originados de yemas que han permanecido en dormición durante más de una estación). Este tipo de material in vitro resulta muy ventajoso, puesto que la inducción embriogénica puede realizarse en cualquier época del año y no está sujeta a las variaciones asociadas a los períodos estacionales, a diferencia de las hojas tomadas directamente del campo.

Las hojas se disponen en placas de Petri que contienen un medio de cultivo con reguladores de crecimiento. Durante varias semanas se somete el material a determinadas concentraciones de estos reguladores y distintos tiempos de exposición a la luz. Se consigue así que una célula inicialmente destinada a formar parte del tejido foliar cambie su modelo de expresión génica y adquiera las características de una célula embriogénica, la cual, mediante sucesivas divisiones puede regenerar un embrión somático. Lamentablemente, el proceso conlleva cierta incertidumbre y el porcentaje de embriones obtenidos (relativamente bajo en los robles) varía mucho según la especie y el genotipo; además, hasta el momento no se conocen los mecanismos moleculares por los cuales una célula cambia su patrón de división hacia el estado embriogénico. Este es un objetivo que deberá abordarse próximamente con el fin de poder clonar cualquier especie y genotipo de roble.

En una segunda etapa se hacen multiplicar los embriones somáticos. Los cultivos embriogénicos de numerosas especies, incluidos los robles, tienen la capacidad de producir de forma continua e ilimitada un gran número de embriones somáticos secundarios. Este hecho confiere a la técnica su enorme potencial para la propagación clonal en masa de las plantas, que puede aumentar aún más si el cultivo se realiza en biorreactores, según ya hemos demostrado para el roble común. Uno de los inconvenientes de esta etapa es que los embriones no se desarrollan de forma sincronizada, por lo que en un mismo tiempo puede haber varios en diferentes estados de desarrollo. Una solución para mitigar este problema consiste en separar aquellos embriones que se hallan en un estado de desarrollo similar y cultivarlos en medio líquido.

La tercera etapa del proceso conlleva la maduración y la germinación de los embriones. Igual que en la etapa de inducción, las tasas de germinación y obtención de plantas son muy variables entre especies y genotipos de roble; en el mejor de los casos se alcanzan valores de germinación cercanos al 50 por ciento. Por consiguiente, se pierde parte del enorme potencial de la técnica porque no se controlan todavía los mecanismos que determinan los procesos de maduración y germinación de los embriones somáticos. Se trata de un campo de investigación que deberá desarrollarse en un futuro próximo.

Las plantas de roble derivadas de los embriones somáticos, tras un período de aclimatación en invernadero, pueden crecer en condiciones de campo y muestran un fenotipo similar a los individuos parentales.

Transformación genética

Otra de las ventajas de la embriogénesis somática es que ofrece la posibilidad de mejorar genéticamente una especie a través de un proceso denominado transformación genética, lo cual reviste particular interés en el caso de los robles afectados por la seca.

Con esta estrategia se intenta promover la sobreexpresión de los genes que confieren tolerancia o resistencia a las enfermedades fúngicas. Lamentablemente, todavía no se conocen los genes específicos que gobiernan estas enferme-

CORTESÍA DE LAS AUTORAS

dades. La existencia de una plataforma internacional (www.fagaceae.com) dirigida al aislamiento y caracterización de miles de genes de las especies comprendidas en la familia Fagáceas (entre ellas, las del género *Quercus*) quizá permita identificar aquellos que puedan estar más directamente relacionados con tales afecciones.

Mientras tanto, nuestro equipo ha definido un procedimiento con el que, por vez primera, se ha conseguido la transformación genética del roble común. En una primera fase se han cultivado embriones somáticos junto con cepas de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* portadoras de genes marcadores que permiten una selección visual de los embriones transformados. En un segundo nivel de experimentación, se ha logrado incorporar en los embriones un gen aislado de castaño (*CsTL1*). Este gen tiene la particularidad de codificar una proteína de tipo taumatina que, de forma genérica, aumenta la tolerancia de los árboles al ataque por hongos. Sin embargo, de momento no se ha concluido la etapa de evaluación de la resistencia en las plantas transformadas.

Cabe mencionar aquí que sería interesante identificar genes del roble implicados en la resistencia a los ataques fúngicos al objeto de poder sobreexpresarlos en el propio árbol. Las plantas cisgénicas (las transformadas con genes propios) resultantes tienen la ventaja de que no incorporan genes de otras especies, a diferencia de las plantas transgénicas, menos aceptadas socialmente.

Tanto las líneas embriogénicas de roble derivadas de árboles adultos seleccionados como las líneas obtenidas mediante trasformación genética se conservan en nuestro laboratorio almacenadas en nitrógeno líquido (crioconservación), por lo que se dispone de un banco de germoplasma de indudable valor. Los ejemplares aislados de rodales selectos, cuya conservación se halla amenazada a causa de catástrofes naturales, incendios u otros sucesos, tienen sus copias en el laboratorio, en forma de líneas embriogénicas, de donde pueden reponerse en cualquier momento. Aumentar las entradas de material de roble en el banco de germoplasma constituye un objetivo que se ha establecido para los próximos años.

—Ana M. Vieitez y Elena Corredoira
Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia, CSIC
Santiago de Compostela

PARA SABER MÁS

Clonal propagation via somatic embryogenesis in *Quercus* spp. E. Corredoira, M. Toribio y M. Vieitez en *Tree Biotechnology*, págs. 262-302. CRC Press, Boca Ratón, EE.UU., 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Conservación de plantas de interés forestal. Antonio Troncoso de Arce et al. en *IyC*, agosto de 2004.
Producción forestal. Aplicación de la biotecnología. Antonio Ballester y Ana M. Vieitez en *IyC*, febrero de 2005.

FÍSICA

Una nueva técnica para detectar ondas gravitacionales

Los condensados de Bose-Einstein podrían facilitar la observación del esquivo fenómeno mediante dispositivos mucho más manejables que los usados en la actualidad

CARLOS SABÍN LESTAYO

En marzo del año pasado, una noticia alborotó a la comunidad de físicos: los investigadores del experimento BICEP2, un telescopio de microondas instalado en el Polo Sur, anunciaron haber obtenido pruebas indirectas de la existencia de ondas gravitacionales primordiales [*véase* «Tras las huellas de la inflación», por Robert Schwarz; Investigación y Ciencia, julio de 2014].

Las ondas gravitacionales constituyen una predicción inequívoca de la teoría de la relatividad general de Einstein. Según ella, las manzanas no caen porque una fuerza las atraiga hacia el centro de la Tierra, sino porque la masa de nuestro planeta deforma la geometría del espacio circundante y altera el paso del tiempo. Al caer, los cuerpos siguen el camino más corto posible en un espaciotiempo curvo, una estructura única que combina estos dos aspectos de la realidad.

Del mismo modo que una carga eléctrica oscilante genera ondas electromagnéticas, resulta natural pensar que, si las masas deforman el espaciotiempo, un cuerpo en movimiento acelerado producirá «ondas de espaciotiempo»; es decir, ondas gravitacionales. Sin embargo, cien años después de que Einstein formulase su teoría, nadie ha conseguido detectarlas. Aunque varios indicios indirectos apuntan a su existencia (como, en caso de confirmarse, los resultados de BICEP2), su detección por medios directos sigue siendo una de las mayores empresas experimentales en física fundamental.

Hace unos meses, en una colaboración entre investigadores de la Universidad de Nottingham y la Universidad Hebrea de Jerusalén, propusimos un método para detectar ondas gravitacionales muy distinto de los empleados hasta ahora. Nuestra técnica se basa en otra de las predicciones del célebre físico alemán: la existencia de un estado exótico de la materia solo posible a temperaturas muy cercanas al cero absoluto. Aunque por el momento solo se trata de un resultado teórico preliminar, creemos que es lo suficientemente prometedor como para abrir una nueva línea de investigación complementaria a las actuales, basadas en experimentos muy voluminosos y difíciles de llevar a cabo.

Búsquedas directas e indirectas

¿Qué había de «primordial» en las ondas gravitacionales anunciadas por BICEP2? En este caso, el término se refería a las ondas que, según las teorías cosmológicas actuales, tuvieron que generarse durante la gran explosión que dio origen a nuestro universo. Al propagarse, esas distorsiones espaciotemporales habrían dejado una huella característica en el fondo cósmico de microondas, emitido poco tiempo

CREACIÓN DE FONONES POR ONDAS GRAVITACIONALES: Las distorsiones del espaciotiempo pueden generar fonones en condensados de Bose-Einstein (BEC). Un BEC se compone de un conjunto de átomos fríos confinados en un potencial (*a*). A su paso, una onda gravitacional modificará la forma de dicho potencial (*b*). Debido al proceso conocido como efecto Casimir dinámico, se espera que esos cambios en las condiciones de contorno generen ciertas excitaciones cuánticas en el medio llamadas fonones (*c*). Según un trabajo reciente, las medidas sobre el estado final del BEC permitirían determinar la amplitud de la onda gravitacional.

después. Tras analizar las propiedades de dicha radiación electromagnética, los investigadores de BICEP2 habrían detectado un vestigio indirecto de las ondas gravitacionales creadas durante el nacimiento del universo.

Pero, aunque estudiar un fósil resulte sin duda muy interesante, jamás podrá compararse a ver un dinosaurio vivo. El equivalente a esto último es lo que, desde 2002, persigue el experimento estadounidense LIGO, un gran observatorio de ondas gravitacionales basado en técnicas de interferometría láser.

Las ondas gravitacionales que podemos esperar detectar en la Tierra tienen su origen en algunos de los fenómenos más violentos del universo, como las colisiones entre agujeros negros. Por fortuna, tales procesos ocurren a miles de años luz de nuestro planeta. Pero, precisamente por ello, cuando las ondas alcanzan la Tierra su intensidad es mínima. Por esa razón los espejos del interferómetro LIGO pesan unos diez kilos cada uno y se encuentran separados varios kilómetros, suspendidos en el vacío y extremadamente bien aislados de cualquier vibración. Hasta ahora, sin embargo, la colaboración no ha referido ninguna observación exitosa.

Entre otras alternativas, un experimento similar, VIRGO, funciona en Italia desde 2007. Y, para 2034, la Agencia Espacial Europea planea lanzar la Antena Espacial de Interferometría Láser (LISA), un ambicioso proyecto para detectar ondas gravitacionales desde el espacio mediante varios satélites separados millones de kilómetros.

Ondas en la mesa del laboratorio

Como alternativa a tales esfuerzos experimentales, Ivette Fuentes, líder del grupo de tecnologías cuánticas relativistas de la Universidad de Nottingham, consideró la posibilidad de detectar ondas gravitacionales en un sistema menor y mucho más manejable: un condensado de Bose-Einstein (BEC).

Un BEC se compone de un puñado de átomos (unos cien millones) sometidos a temperaturas muy próximas al cero absoluto (273,15 grados centígrados bajo cero) y confinados en un espacio de pocos micrómetros. En condiciones normales, los átomos de una sustancia no paran de moverse a toda velocidad en direcciones aleatorias. En un BEC, sin embargo, los átomos se comportan como si fuesen una sola entidad, por lo que pueden considerarse un mar cuántico en calma.

Las pequeñas «olas» que surcan un BEC dan lugar a ciertos estados cuánticos llamados fonones. Bajo ciertas circunstancias, estos se comportan de manera similar a las partículas de luz, si bien se desplazan a una velocidad mucho menor. La idea de Fuentes consistía en analizar qué efecto provocaría una onda gravitacional sobre los fonones de un BEC.

A su paso, una onda gravitacional modificará la longitud del espacio en que se encuentra confinado el BEC. Se sabe que, en un medio cuántico, esa clase de distorsiones en las condiciones de contorno puede generar nuevas excitaciones. Este fenómeno recibe el nombre de efecto Casimir dinámico. En el caso de la luz, dicho proceso se encuentra relacionado con los fotones virtuales que pueblan el vacío cuántico, y fue demostrado experimentalmente en 2011 por investigadores de la Universidad de Chalmers de Gotemburgo [*véase* «Cómo crear fotones a partir del vacío», por Diego A. R. Dalvit; Investigación y Ciencia, mayo de 2012]. En nuestro caso, el mismo principio se aplicaría a los fonones de un BEC.

Dada la frecuencia de las ondas gravitacionales que podemos esperar detectar en la Tierra, dicho efecto sería imposible de observar con fotones (por ejemplo, en LIGO). Sin embargo, algo muy distinto ocurre en un BEC. Junto con otros investigadores, analizamos la propuesta de Fuentes y llegamos a la conclusión de que, en principio, los fonones creados en un BEC por el paso de una onda gravitacional podrían detectarse con tecnología disponible a medio plazo. De hecho, la sensibilidad de este método superaría a la de LIGO. Nuestros resultados fueron publicados en agosto de 2014 en el *New Journal of Physics*.

Por supuesto, observar ondas gravitacionales con esta nueva técnica tampoco resultará sencillo, ya que todo experimento deberá llevarse a cabo con sumo cuidado para distinguir entre los efectos de una onda gravitacional y los generados por vibraciones de cualquier otro tipo. En todo caso, creemos que el objetivo merece la pena. Verle la cara a las misteriosas arrugas del espaciotiempo no solo confirmaría las predicciones de Einstein, sino que nos ayudaría a entender mejor el tejido del universo.

—Carlos Sabín Lestayo
Escuela de Ciencias Matemáticas
Universidad de Nottingham

PARA SABER MÁS

Phonon creation by gravitational waves. Carlos Sabín et al. en *New Journal of Physics*, vol. 16, 085003, agosto de 2014. Disponible en **iopscience.iop.org/1367-2630/16/8/085003**

EN NUESTRO ARCHIVO

Púlsares y ondas gravitacionales. Michael Kramer y Norbert Wex en *IyC*, abril de 2013.
Cómo oír la gran explosión. Ross D. Andersen en *IyC*, diciembre de 2013.

COMUNICACIÓN

¿Cháchara o sustancia?

Los temas científicos que mayor atención reciben en los blogs académicos no son los mismos que triunfan en los medios generalistas o en las redes sociales

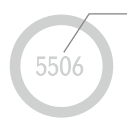
MARK FISCHETTI

Cada día se publican cientos de artículos de investigación en todo el mundo. Pero ¿cuáles son los más citados y en qué círculos? Para saberlo, Altmetric, de Londres, ha contado cuántas veces se los citaba en catorce canales digitales, unos serios (la red de citas de artículos académicos Mendeley y cinco mil blogs de investigadores), otros de moda (Twitter, Facebook) y los que caen entre lo uno y lo otro (mil medios informativos). Altmetric vertió los datos de 2014 en un algoritmo que confeccionó un mapa (*mostrado aquí solo para los doscientos artículos más destacados*). Los resultados descubren una divisoria: los artículos más citados en los canales serios (*círculos azules y violetas, que tienden a caer en la izquierda de la página*) son diferentes de los más mencionados en las redes sociales (*rojos y amarillos, que se acumulan a la derecha).*

Entre los temas que más puntúan en los sitios académicos están los defectos de la investigación científica, las células humanas, el funcionamiento del cerebro y los avances médicos. Las redes sociales se inclinan por los errores científicos, el sistema solar y el universo, y la salud.

El ruido que hacen los artículos de investigación más difundidos

En esta gráfica se representan los 200 artículos de revistas científicas de los que más se ha hablado en 2014* (*aros grises; muchos se solapan*). Los cinco primeros están numerados (todos los títulos se han traducido al español). Cuanto mayor el aro, más se los ha citado:



Los artículos más mencionados en los canales académicos e informativos se dibujan en azul; los más comentados en las redes sociales, en rojo, naranja y amarillo. Se representan seis canales destacados, de catorce:

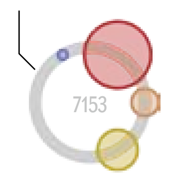
Blogs de investigadores · Periódicos y revistas para el gran público · Mendeley (red de citaciones académicas) · Facebook · Google+ · Twitter

Los artículos con una mezcla parecida de tipos de citas tienden a juntarse entre sí y a separarse de los que tienen una mezcla distinta; los atípicos presentan una pauta rara de citas: a menudo, muchísimas en un canal y pocas en los demás.

El tamaño de los círculos coloreados (canales) mide el número de citas por encima de la media del canal correspondiente.

*De finales de octubre de 2013 a finales de octubre de 2014

1 **Las simulaciones respaldan la teoría de que el universo es un holograma** (Noticia de *Nature*, 10 de diciembre de 2013)
El más citado en Facebook



2 **La colaboración en línea: Los científicos y las redes sociales** (Noticia de *Nature*, 14 de agosto de 2014)
El papel de los científicos en las redes sociales suscita mucha atención

3 **Síntesis de moléculas antropomorfas: Los *NanoPutians*** (Artículo de investigación del *Journal of Organic Chemistry*, 14 de noviembre de 2003)
Que se hable de un viejo artículo en las redes sociales puede darle nueva popularidad

4 **Pruebas experimentales del contagio emocional a muy gran escala a través de las redes sociales** (Artículo de investigación de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 17 de junio de 2014)
El más citado en los medios de comunicación

5 **Resumen de la contaminación por cesio activo de los peces de agua dulce en Fukushima y el este de Japón** (Artículo de investigación de *Scientific Reports*, 29 de abril de 2013)
El más citado en Twitter

Ecología: Un mundo sin mosquitos (Noticia de *Nature*, 22 de julio de 2010)
Una gama de citas inusualmente amplia

Los edulcorantes artificiales inducen intolerancia a la glucosa al alterar la microbiota intestinal (Artículo de investigación de *Nature*, 9 de octubre de 2014)
Una gama de citas inusualmente amplia

Agonistas de producto natural del receptor gamma activado por proliferadores de peroxisoma (PPARγ) (Artículo de revisión en *Biochemical Pharmacology*, 1 de noviembre de 2014)
El más citado en Google+

Por qué la mayor parte de los hallazgos de investigaciones publicados son falsos (Artículo de investigación de *PLOS Medicine*, agosto de 2005)
El más mencionado en Mendeley y los blogs

FUENTE: ALTMETRIC; JAN WILLEM TULP (*gráfico*)



ASTROBIOLOGÍA

MÁS ACOGEDORES QUE LA TIERRA

Algunos mundos muy distintos del nuestro tal vez resulten mucho más aptos para albergar vida

René Heller



SUPERHABITABLE: Una supertierra rocosa en torno a una estrella menor que el Sol presentaría un aspecto tan familiar como extraño. El paisaje sería más plano debido a la mayor gravedad superficial y a una atmósfera más espesa, y las plantas adoptarían una tonalidad más oscura para absorber mejor la tenue luz estelar.



René Heller es investigador posdoctoral en el Instituto Origins de la Universidad McMaster en Ontario y forma parte del Programa Canadiense de Formación en Astrobiología. Su trabajo se centra en la formación, evolución orbital, detección y habitabilidad de satélites extrasolares.

¿Vivimos en el mejor de los mundos posibles? Así pensaba Leibniz, quien en 1710 escribió que, a pesar de todos sus inconvenientes, nuestro planeta debía ser el más sobresaliente de cuantos cupiese imaginar. En su tiempo la idea fue despreciada y considerada una mera ilusión acientífica, muy especialmente por parte de Voltaire, que satirizó el optimismo del ilustrado alemán en su obra maestra, *Cándido*. Hoy, sin embargo, Leibniz podría haberse granjeado la simpatía de, al menos, un colectivo de científicos: el de aquellos astrónomos que, durante décadas, han visto en la Tierra el modelo ideal a la hora de buscar vida más allá del sistema solar.

Dado que los terrícolas solo conocemos un mundo habitable —el nuestro—, tiene sentido que tomemos la Tierra como referencia al considerar la posible existencia de vida en otros planetas. Así ha ocurrido en el pasado, cuando los expertos se han lanzado a explorar las regiones de Marte más similares a la Tierra o el acuoso mundo de Europa, la luna de Júpiter. Desde hace un tiempo, sin embargo, el hallazgo de algunos exoplanetas potencialmente habitables ha comenzado a desafiar esa visión tan geocéntrica.

En las últimas dos décadas se han descubierto más de 1800 exoplanetas [*véase* «Superabundancia de planetas», por John Matson; Investigación y Ciencia, febrero de 2013]. Y la estadística sugiere que nuestra galaxia debería albergar, al menos, unos 100.000 millones. No obstante, pocos de los detectados hasta ahora se parecen al nuestro. Los exoplanetas conocidos presentan una enorme variedad de órbitas, tamaños y composiciones, y se sitúan cerca de estrellas de todo tipo; entre ellas, algunas menores y más tenues que el Sol. A la vista de ese amplio abanico de características, varios investigadores hemos empezado a sospechar que tal vez la Tierra no ocupe el primer puesto en lo que se refiere a la habitabilidad. Algunos exoplanetas muy diferentes del nuestro podrían resultar mucho más adecuados para formar y mantener una biosfera estable. De ser el caso, estos «mundos superhabitables» constituirían un objetivo óptimo para las futuras búsquedas de vida fuera de nuestro sistema planetario.

UN PLANETA IMPERFECTO

No cabe duda de que nuestro planeta presenta numerosas cualidades que, a primera vista, parecen ideales para albergar vida. Orbita en torno a una estrella tranquila y de mediana edad que ha brillado con regularidad durante miles de millones de años, un tiempo suficiente para permitir que la vida surgiese y evolucionase. La existencia de océanos de agua líquida se debe, sobre todo, a que su órbita se encuentra en la «franja de habitabilidad» del Sol, una estrecha región en la que la luz del astro no resulta demasiado intensa ni demasiado débil. Si nuestro planeta se hallase algo más cerca de la estrella, el agua herviría; en caso contrario, se convertiría en hielo. También el tamaño de la Tierra parece óptimo: lo bastante grande para retener una atmósfera considerable gracias a su campo gravitatorio, pero no tanto como para rodearse de una sofocante y opaca mortaja de gas. Las dimensiones y la composición rocosa de nuestro planeta dan lugar a otras características favorables para la vida, como una tectónica de placas que ayuda a regular el clima y un campo magnético que protege la biosfera de radiación cósmica.

No obstante, cuanto más a fondo estudiamos la habitabilidad de nuestro planeta, menos ideal se muestra. Hoy, extensas zonas de su superficie resultan bastante hostiles a la vida; entre ellas, los desiertos, el océano abierto y pobre en nutrientes o las gélidas regiones polares. Pero no siempre ha sido así. Hace entre 350 y 300 millones de años, durante la mayor parte del período Carbonífero, la atmósfera terrestre era más

PÁGINAS ANTERIORES: RON MILLER

EN SÍNTESIS

Hasta ahora, los astrónomos han buscado planetas similares a la Tierra en torno a estrellas semejantes al Sol. Sin embargo, detectarlos se encuentra en el límite de las capacidades técnicas.

Las supertierras que orbitasen en torno a estrellas más tenues que el Sol resultarían más fáciles de detectar. Además, tales planetas tal vez sean mucho más comunes que el nuestro.

Algunas investigaciones recientes sugieren que esos mundos, así como los satélites de algunos exoplanetas gigantes gaseosos, podrían ser más aptos para la vida que el nuestro.

cálida, húmeda y mucho más rica en oxígeno que hoy. En los mares prosperaban los crustáceos, los peces y los corales, y las zonas continentales se hallaban cubiertas por frondosos bosques donde los insectos y otras criaturas alcanzaban tamaños gigantescos. En el Carbonífero, nuestro planeta pudo haber sustentado una biomasa mucho mayor que en la actualidad. Así pues, la Tierra parece hoy menos habitable que en otras épocas de su pasado remoto.

Pero nuestro planeta aún se tornará mucho más hostil en el futuro. Dentro de 5000 millones de años, el Sol habrá agotado la mayor parte del hidrógeno y en su núcleo comenzará la fusión del helio, más energética. Ello expandirá el astro hasta convertirlo en una gigante roja que carbonizará la Tierra. En nuestro planeta, sin embargo, la vida se habrá extinguido mucho antes. A medida que el Sol consuma su hidrógeno, la temperatura en su núcleo aumentará, lo que elevará la luminosidad total de la estrella en torno a un 10 por ciento cada mil millones de años. Eso significa que la franja de habitabilidad del Sol no es estática, sino dinámica, y que con el paso del tiempo acabará dejando atrás la órbita terrestre. Por si fuera poco, cálculos recientes sugieren que, en la actualidad, la Tierra no se encuentra en el centro de la zona habitable, sino más bien en su corona interior, en la frontera del sobrecalentamiento.

Dentro de unos 500 millones de años, el Sol creará en la Tierra un clima tan febril que pondrá en peligro la vida multicelular compleja. Y, dentro de 1750 millones de años, el brillo creciente de la estrella causará la evaporación de los océanos y exterminará cualquier forma de vida sencilla que aún persista en la superficie. Nuestro planeta ha superado con creces el esplendor de habitabilidad, y la biosfera se aproxima con rapidez a sus límites. Al considerar todos estos factores, parece razonable concluir que, hoy por hoy, nuestro planeta solo es marginalmente habitable.

La biosfera terrestre se aproxima con rapidez a sus propios límites. Al considerar todos los factores, parece razonable concluir que, en la actualidad, nuestro planeta solo es marginalmente habitable

MUNDOS SUPERHABITABLES

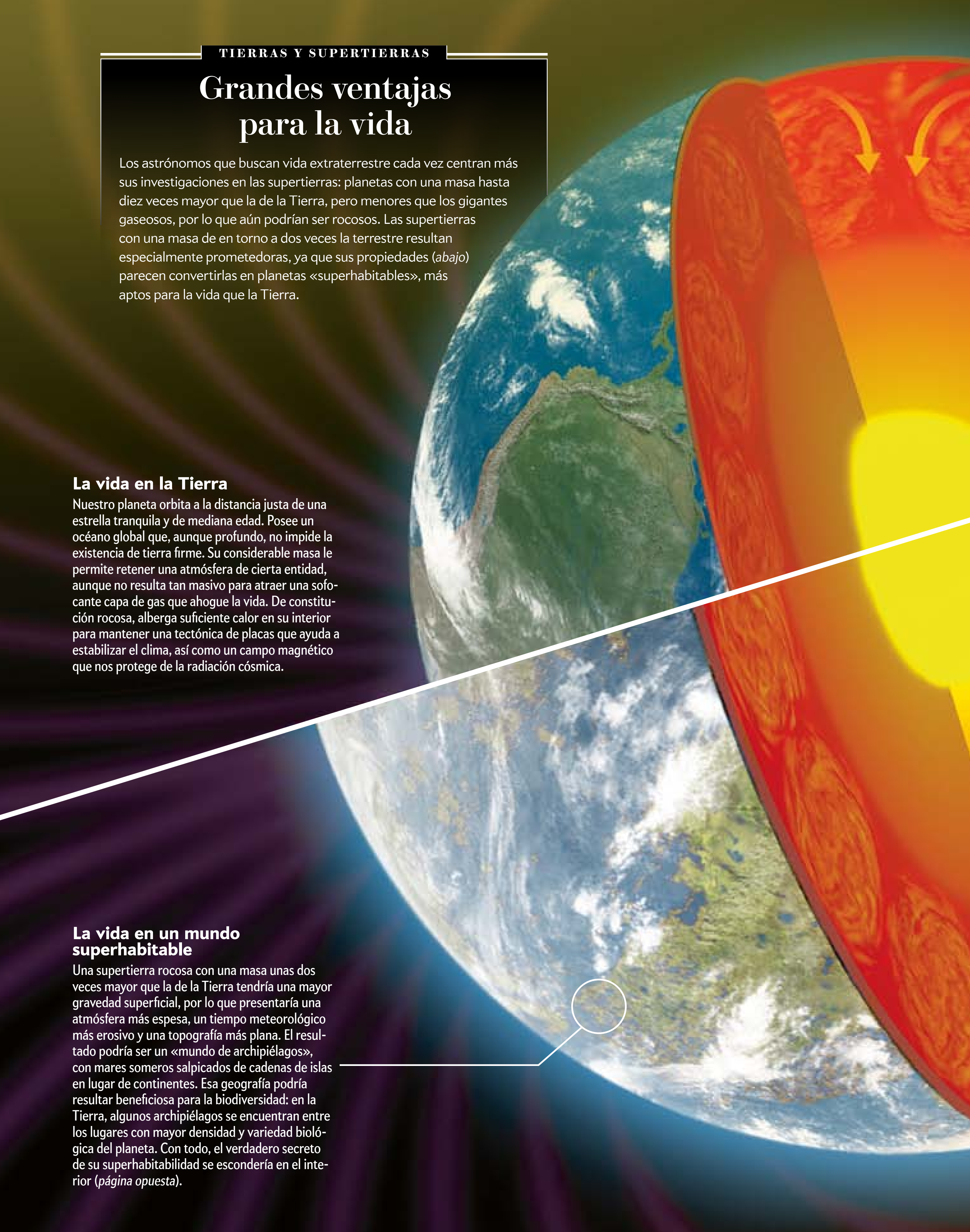
En 2012, mientras investigaba la habitabilidad de los enormes satélites que orbitan alrededor de los planetas gigantes gaseosos, comencé a considerar qué aspecto presentaría un mundo más hospitalario que el nuestro. El mayor satélite del sistema solar es Ganímedes, una de las lunas de Júpiter. Pero su masa solo asciende a un 2,5 por ciento de la terrestre, por lo que resulta demasiado ligero para retener una atmósfera similar a la de nuestro planeta. Sin embargo, pensé que no era imposible que, en otros sistemas planetarios, hubiese satélites con masas próximas a la de la Tierra. Algo así podría suceder, sobre todo, cerca de planetas gigantes, en cuyo caso tal vez sus lunas albergasen atmósferas similares a la nuestra.

Si se encontrasen en la franja de habitabilidad de su estrella, esos «exosatélites» gigantes podrían resultar mucho más aptos para la vida que nuestro planeta, ya que una biosfera potencial dispondría de una rica variedad de recursos energéticos. A diferencia de la vida en la Tierra, que depende principalmente de la luz solar, tales exosatélites podrían también extraer energía de la luz reflejada y del calor emitido por el planeta gigante, e incluso de su campo gravitatorio. Al orbitar en torno a un planeta de gran tamaño, las fuerzas de marea alcanzarían una intensidad suficiente para combar periódicamente la corteza del satélite, lo que produciría un rozamiento que lo calentaría desde dentro. De hecho, el calentamiento por fuerzas de marea probablemente haya causado la formación de los océanos subsuperficiales que se piensa que existen en Europa, la luna de Júpiter, y en Encélado, uno de los satélites de Saturno. Con todo, esa diversidad energética tal vez se convirtiese en una espada de doble filo, ya que cualquier desequilibrio entre las distintas fuentes de energía podría tornar inhabitable un mundo semejante.

Aún no se ha confirmado la existencia de ningún exosatélite, habitable o no, aunque parece fácil que tarde o temprano asome alguno en los datos de archivo de observatorios como el telescopio espacial Kepler, de la NASA. Por el momento, tanto la existencia de estos objetos como su posible habitabilidad no pasan de la mera especulación.

Sin embargo, el primer planeta superhabitable tal vez figure ya en nuestro catálogo de exoplanetas confirmados o candidatos. Los primeros exoplanetas descubiertos a mediados de los años noventa eran todos gigantes gaseosos con masas similares a la de Júpiter y estaban situados en órbitas demasiado próximas a su estrella anfitriona. Pero, a medida que las técnicas de detección fueron mejorando, comenzaron a aparecer exoplanetas menores y en órbitas más alejadas. De hecho, la mayoría de los descubiertos durante los últimos años son supertierras: planetas con una masa inferior a diez veces la terrestre y radios que oscilan entre el de nuestro planeta y el de Neptuno. Estos se han revelado muy comunes en otras estrellas, si bien nuestro sistema planetario no cuenta con ninguno, lo que lo convierte en un caso algo atípico.

Buena parte de las supertierras mayores y más masivas probablemente se encuentren envueltas por hinchadas y espesas atmósferas, por lo que vendrían a ser más «minineptunos» que versiones voluminosas de la Tierra. Pero parece fácil que algunas de las de menor tamaño, hasta unas dos veces más masivas que nuestro planeta, presenten una composición similar a la terrestre, con abundante hierro y rocas, así como una superficie rica en agua líquida en caso de hallarse en la franja de habitabilidad de su estrella. Hoy sabemos que algunas de las supertierras potencialmente rocosas orbitan alrededor de estrellas enanas de tipo M y K, las cuales son menores, más tenues y mucho más longevas que el Sol. En una modelización reciente realizada junto con mi colaborador John Armstrong, físico de la Universidad estatal de Weber, hemos demostrado que, debido en parte a la prolongada vida de estas estrellas, sus posibles supertierras se



TIERRAS Y SUPERTIERRAS

Grandes ventajas para la vida

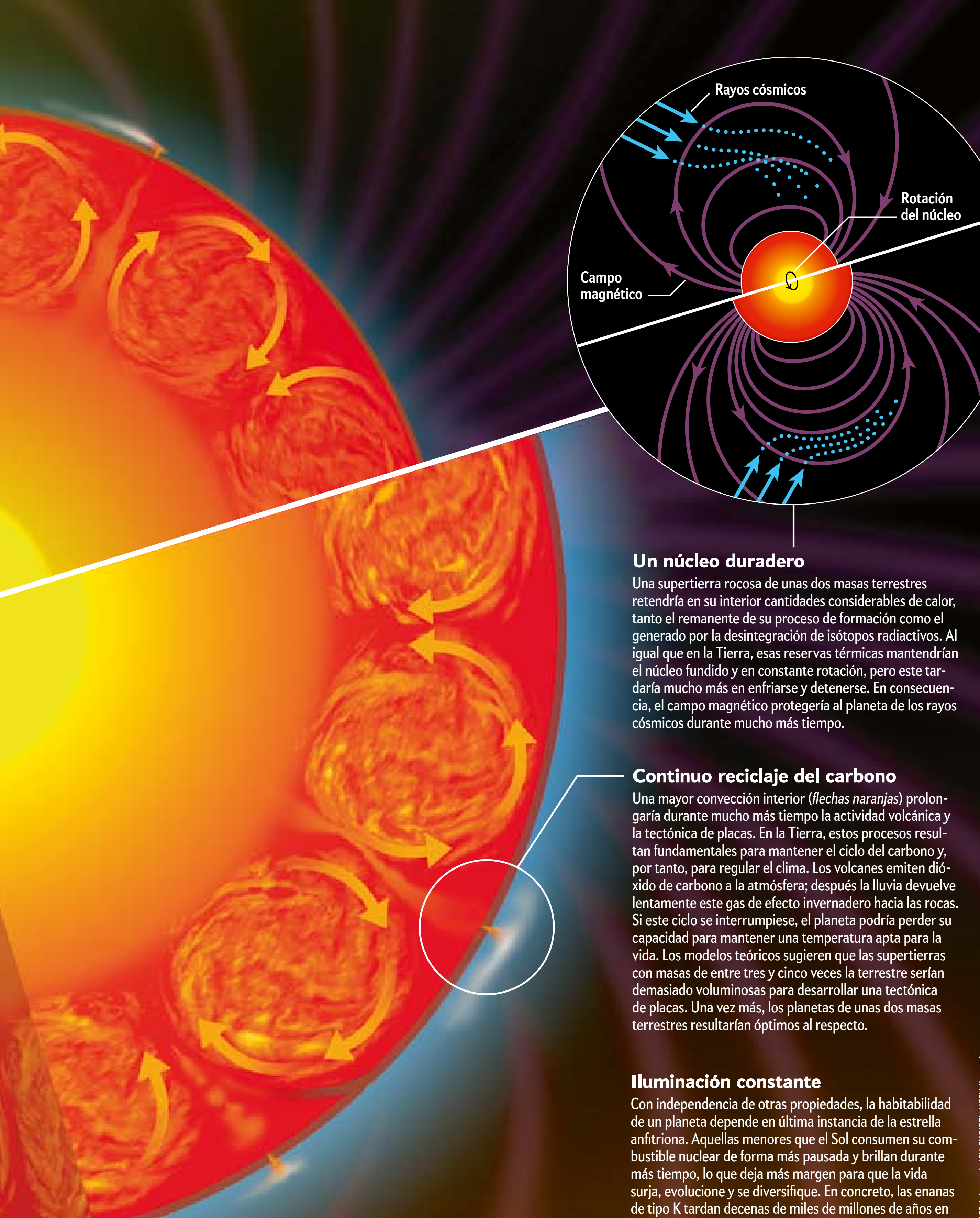
Los astrónomos que buscan vida extraterrestre cada vez centran más sus investigaciones en las supertierras: planetas con una masa hasta diez veces mayor que la de la Tierra, pero menores que los gigantes gaseosos, por lo que aún podrían ser rocosos. Las supertierras con una masa de en torno a dos veces la terrestre resultan especialmente prometedoras, ya que sus propiedades (*abajo*) parecen convertirlas en planetas «superhabitables», más aptos para la vida que la Tierra.

La vida en la Tierra

Nuestro planeta orbita a la distancia justa de una estrella tranquila y de mediana edad. Posee un océano global que, aunque profundo, no impide la existencia de tierra firme. Su considerable masa le permite retener una atmósfera de cierta entidad, aunque no resulta tan masivo para atraer una sofocante capa de gas que ahogue la vida. De constitución rocosa, alberga suficiente calor en su interior para mantener una tectónica de placas que ayuda a estabilizar el clima, así como un campo magnético que nos protege de la radiación cósmica.

La vida en un mundo superhabitable

Una supertierra rocosa con una masa unas dos veces mayor que la de la Tierra tendría una mayor gravedad superficial, por lo que presentaría una atmósfera más espesa, un tiempo meteorológico más erosivo y una topografía más plana. El resultado podría ser un «mundo de archipiélagos», con mares someros salpicados de cadenas de islas en lugar de continentes. Esa geografía podría resultar beneficiosa para la biodiversidad: en la Tierra, algunos archipiélagos se encuentran entre los lugares con mayor densidad y variedad biológica del planeta. Con todo, el verdadero secreto de su superhabitabilidad se escondería en el interior (*página opuesta*).



Un núcleo duradero

Una supertierra rocosa de unos dos masas terrestres retendría en su interior cantidades considerables de calor, tanto el remanente de su proceso de formación como el generado por la desintegración de isótopos radiactivos. Al igual que en la Tierra, esas reservas térmicas mantendrían el núcleo fundido y en constante rotación, pero este tardaría mucho más en enfriarse y detenerse. En consecuencia, el campo magnético protegería al planeta de los rayos cósmicos durante mucho más tiempo.

Continuo reciclaje del carbono

Una mayor convección interior (*flechas naranjas*) prolongaría durante mucho más tiempo la actividad volcánica y la tectónica de placas. En la Tierra, estos procesos resultan fundamentales para mantener el ciclo del carbono y, por tanto, para regular el clima. Los volcanes emiten dióxido de carbono a la atmósfera; después la lluvia devuelve lentamente este gas de efecto invernadero hacia las rocas. Si este ciclo se interrumpiese, el planeta podría perder su capacidad para mantener una temperatura apta para la vida. Los modelos teóricos sugieren que las supertierras con masas de entre tres y cinco veces la terrestre serían demasiado voluminosas para desarrollar una tectónica de placas. Una vez más, los planetas de unas dos masas terrestres resultarían óptimos al respecto.

Iluminación constante

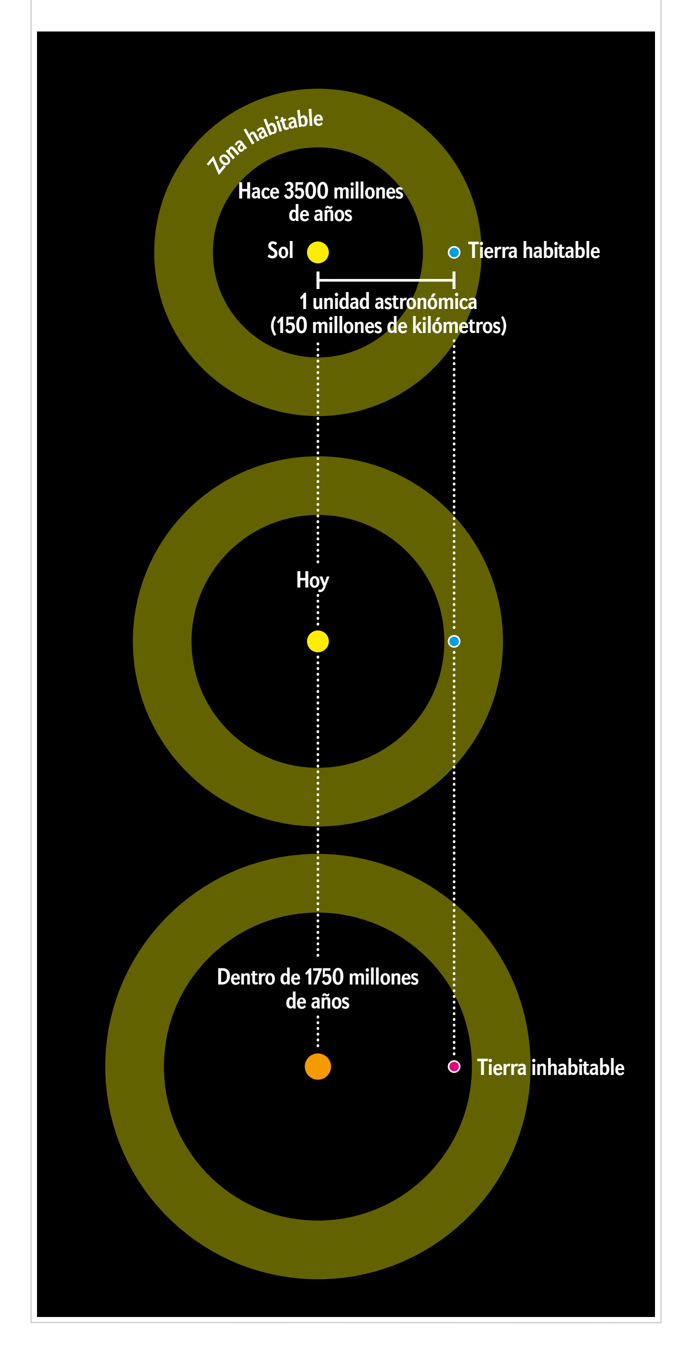
Con independencia de otras propiedades, la habitabilidad de un planeta depende en última instancia de la estrella anfitriona. Aquellas menores que el Sol consumen su combustible nuclear de forma más pausada y brillan durante más tiempo, lo que deja más margen para que la vida surja, evolucione y se diversifique. En concreto, las enanas de tipo K tardan decenas de miles de millones de años en extinguirse, mucho más que los 10.000 millones de años que se calcula que vivirá el Sol. Al mismo tiempo, proporcionan una cantidad de luz suficiente para alimentar la vida en un planeta cercano. Una pequeña supertierra que orbitase en la zona habitable de una enana de tipo K podría alcanzar el nivel óptimo de habitabilidad.

ILUSTRACIÓN DE RON MILLER (*planetas*); JEN CHRISTIANSEN (*inserto*)

FRANJA DE HABITABILIDAD

El carácter dinámico de las órbitas hospitalarias

En escalas humanas, la franja de habitabilidad de una estrella parece estática. Sin embargo, dado que una estrella como el Sol aumenta su luminosidad a medida que envejece, la zona en la que puede existir agua líquida se desplaza progresivamente hacia el exterior. Hoy la Tierra se encuentra en el borde interior de la franja de habitabilidad del Sol. Dentro de unos 1750 millones de años, esta habrá dejado atrás la órbita de nuestro planeta. Las estrellas menores son más tenues y viven durante más tiempo, por lo que sus respectivas zonas habitables se mantienen prácticamente estables durante decenas de miles de millones de años.



JEN CHRISTIANSEN

postulan, hoy por hoy, como los candidatos más prometedores a constituir mundos superhabitables.

LAS VENTAJAS DE LA LONGEVIDAD

Nuestro trabajo comenzó cuando entendimos que, para que un mundo resulte superhabitable, el requisito principal es que su estrella anfitriona goce de una vida muy larga. Después de todo, no parece probable que ninguna biosfera vaya a sobrevivir a la muerte de su sol. El nuestro cuenta hoy 4600 millones de años, por lo que se halla hacia la mitad de su vida, estimada en unos 10.000 millones de años. Pero, si fuese algo más pequeño, se correspondería con una enana de tipo K. En términos absolutos, estos astros disponen de menos combustible nuclear que otros de mayor masa; sin embargo, lo consumen con mayor eficiencia, de manera que brillan durante más tiempo. Aunque las enanas de tipo K de mediana edad que observamos hoy son miles de millones de años más viejas que el Sol, aún seguirán brillando miles de millones de años después de que este se haya apagado. Por tanto, tales estrellas ofrecen a una posible biosfera mucho más tiempo para que la vida surja, evolucione y se diversifique.

La luz de una enana de tipo K aparecería algo más rojiza que la del Sol, ya que el espectro de estas estrellas se encuentra más desplazado hacia el infrarrojo. A pesar de ello, su abanico espectral basta para permitir la fotosíntesis. Las enanas de tipo M son aún menores y más parsimoniosas, por lo que brillan durante cientos de miles de millones de años. Sin embargo, su luz resulta tan tenue que sus respectivas franjas de habitabilidad se encuentran muy próximas a la estrella, lo que dejaría a cualquier planeta que se encontrase en esa zona expuesto a las erupciones estelares y otros peligros derivados de la cercanía al astro. Las de tipo K, al vivir mucho más que el Sol pero sin llegar a ser traicioneramente débiles, parecen proporcionar el nivel óptimo de habitabilidad.

Algunas de estas estrellas tal vez alberguen supertierras rocosas miles de millones de años más antiguas que nuestro sistema planetario. La vida pudo surgir en ellas mucho antes de que naciese el Sol, en cuyo caso habría prosperado y evolucionado durante miles de millones de años antes de que la primera molécula biológica apareciese en el caldo primigenio de la joven Tierra. En particular, resulta especialmente fascinadora la posibilidad de que la biosfera de uno de esos mundos arcaicos haya modificado el planeta para hacerlo aún más hospitalario. Algo parecido ya ocurrió en la Tierra durante la Gran Oxidación, hace unos 2400 millones de años. En aquella época, debido probablemente a la acción de las algas oceánicas, nuestra atmósfera comenzó a acumular enormes cantidades de oxígeno. Ello posibilitó la evolución de metabolismos caracterizados por un mayor consumo energético y, con ello, la aparición de organismos de mayor tamaño, más activos y longevos. Aquel cambio resultó clave para que la vida pasase de los océanos a las zonas continentales. Si una biosfera extraterrestre exhibiese procesos similares, el planeta se tornaría más y más habitable a medida que fuese envejeciendo.

Para ser superhabitable, un exoplaneta en torno a una estrella de menor tamaño y más longeva que el Sol tendría que tener una masa mayor que la Tierra. Ello evitaría dos desastres que, con gran probabilidad, acechan a todo planeta rocoso a medida que envejece. Por un lado, si un planeta como la Tierra se encontrase en la franja de habitabilidad de una enana de tipo K, su interior se enfriaría antes de que la estrella se extinguiese. El calor interno de un planeta alimenta las erupciones volcánicas

y la tectónica de placas, procesos que en la Tierra reciclan la atmósfera y aseguran el abastecimiento de dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero. Sin ellos, el CO_2 atmosférico disminuiría progresivamente a medida que la lluvia lo fuese retirando del aire para fijarlo en las rocas. Al final, el efecto invernadero global dependiente del CO_2 se detendría, lo que elevaría la probabilidad de que un planeta similar a la Tierra se convirtiese en una «bola de hielo» inhabitable.

Pero, además de una posible interrupción del efecto invernadero, el enfriamiento interno de un mundo rocoso podría provocar la extinción del campo magnético, en caso de haberlo. En la Tierra, dicho campo funciona como un escudo que mantiene la biosfera a salvo de la radiación cósmica. Está generado por la rotación convectiva del núcleo terrestre, el cual se compone de hierro fundido y actúa como una dinamo. Se mantiene en estado líquido gracias al calor interno que el planeta aún conserva del tiempo de su formación, así como a la energía liberada por la desintegración de los isótopos radiactivos. Pero, una vez que un planeta rocoso agotase las reservas térmicas de su interior, su núcleo se solidificaría, la dinamo se detendría y el escudo magnético acabaría desapareciendo. Los rayos cósmicos y las erupciones solares desgastarían la alta atmósfera y la superficie se vería afectada por elevados índices de radiación, con el consecuente peligro para la vida.

Sin embargo, una supertierra rocosa unas dos veces mayor que nuestro planeta gozaría de una vejez más saludable, ya que retendría el calor interno durante mucho más tiempo. Los planetas aún mayores, con una masa entre tres y cinco veces mayor que la terrestre, tal vez resulten demasiado voluminosos para mantener una tectónica de placas, ya que la elevada presión y la viscosidad de su manto impedirían que el flujo de calor alcanzase la superficie. Pero un planeta rocoso con una masa dos veces mayor que la de la Tierra debería poder mantener la tectónica de placas, los ciclos geológicos y el campo magnético durante varios miles de millones de años más que nuestro planeta. Su diámetro sería también en torno a un 25 por ciento mayor, lo que brindaría a sus organismos un 56 por ciento más de superficie en la que vivir.

LA VIDA EN UN MUNDO SUPERHABITABLE

¿Qué aspecto tendría un planeta así? Su mayor gravedad superficial lo dotaría de una atmósfera algo más gruesa que la terrestre, por lo que sus montañas se erosionarían con mayor rapidez. En otras palabras, el aire sería más denso, y su superficie, más plana. En caso de haber océanos, el aplanado paisaje embalsaría el agua en un gran número de mares someros salpicados de cadenas de islas, en lugar de en enormes cuencas oceánicas interrumpidas por continentes. Y, al igual que los océanos terrestres disfrutan de una mayor biodiversidad en las aguas poco profundas cercanas a la costa, un «mundo de archipiélagos» podría resultar extraordinariamente hospitalario. Además, la evolución tal vez operase mucho más rápido en los ecosistemas insulares aislados, lo que contribuiría a aumentar la biodiversidad.

En ausencia de grandes continentes, la vida sobre tierra firme dispondría de una superficie total menor, lo que podría mermar la habitabilidad global. Aunque no necesariamente, al menos si tenemos en cuenta que las regiones interiores de un continente, al hallarse lejos de la humedad y del efecto termorregulador de los océanos, pueden desertificarse con facilidad. Además, el área superficial habitable de un planeta depende en gran medida de la orientación de su eje de rotación con respecto al plano de la órbita. En la Tierra, dicha inclinación asciende a 23,4 grados, lo que permite la existencia de estaciones y suaviza lo que, de otro modo, devendría en extremas diferencias de temperatura entre el ecuador y los polos. Una supertierra de archipiélagos con una inclinación favorable de su eje de rotación podría disfrutar de un ecuador cálido y de unos polos sin hielo. Y, debido a su gran tamaño, probablemente contase con más terreno apropiado para la vida que un planeta con grandes continentes pero menor superficie total.

Tomadas en conjunto, estas consideraciones apuntan a que los planetas superhabitables son aquellos ligeramente mayores que la Tierra y que orbitan en torno a estrellas algo menores y más tenues que el Sol. Si esta conclusión es correcta, se trata de una excelente noticia, ya que, a distancias interestelares, resulta más sencillo detectar y estudiar supertierras en torno a estrellas de poco tamaño que gemelos del sistema Tierra-Sol. Además, la estadística que se deriva de las investigaciones sobre exoplanetas sugiere que, en nuestra galaxia, las primeras son considerablemente más abundantes que los segundos. Por tanto, parece que los astrónomos disponen de muchos más lugares atractivos donde buscar vida de lo que creíamos.

Ello nos trae a la mente uno de los principales hallazgos del telescopio Kepler: el planeta Kepler-186 f. Descubierto en abril de 2014, presenta un diámetro un 11 por ciento mayor que el de la Tierra, es probablemente de constitución rocosa y orbita en la franja de habitabilidad de una estrella enana de tipo M. Podría tener una edad de varios miles de millones de años, tal vez incluso mayor que la de nuestro planeta. Por desgracia, se encuentra a unos 500 años luz, demasiado lejos para que los observatorios actuales o del futuro inmediato puedan analizar con detalle sus propiedades. Pero, por lo que sabemos, podría tratarse de un mundo de archipiélagos superhabitable.

El hallazgo de los primeros planetas superhabitables más cercanos a la Tierra tal vez llegue en pocos años gracias a varios proyectos. Entre ellos destaca la misión PLATO, de la Agencia Espacial Europea, que tiene prevista su puesta en marcha para 2024. Tales planetas representarían un blanco ideal para el telescopio espacial James Webb, cuyo lanzamiento se espera para 2018 y entre cuyos objetivos se encuentra buscar signos de vida en las atmósferas de otros mundos. Con algo de suerte, tal vez pronto podamos señalar hacia un lugar en el cielo ocupado por un mundo mejor que el nuestro.

PARA SABER MÁS

Habitable climates: The influence of obliquity. David S. Spiegel, Kristen Menou y Caleb A. Scharf en *Astrophysical Journal*, vol. 691, n.º 1, págs. 596-610, enero de 2009. Disponible en **iopscience.iop.org/0004-637X/691/1/596/article**

Exomoon habitability constrained by illumination and tidal heating. René Heller y Rory Barnes en *Astrobiology*, vol. 13, n.º 1, págs. 18-46, enero de 2013. Disponible en **arxiv.org/abs/1209.5323**

Habitable zone lifetimes of exoplanets around main sequence stars. Andrew J. Rushby et al. en *Astrobiology*, vol. 13, n.º 9, págs. 833-849, septiembre de 2013.

Superhabitable worlds. René Heller y John Armstrong en *Astrobiology*, vol. 14, n.º 1, págs. 50-66, enero de 2014. Disponible en **arxiv.org/abs/1401.2392**

EN NUESTRO ARCHIVO

Exoplanetas habitables. Dimitar D. Sasselov y Diana Valencia en *IyC*, octubre de 2010.

El amanecer de los exoplanetas. Michael D. Lemonick en *IyC*, septiembre de 2013.

ASTROBIOLOGÍA

(IN)TRASCENDENCIA CÓSMICA

La cuestión de si estamos solos en el universo exige esclarecer nuestra importancia en términos cósmicos. ¿Somos excepcionalmente únicos o simplemente mediocres?

Caleb Scharf

VIVIMOS EN UN PEQUEÑO PLANETA QUE ORBITA ALREDEDOR DE UNA ESTRELLA SOLITARIA y de mediana edad: una más de los 200.000 millones de estrellas que pueblan el descomunal remolino de materia de la Vía Láctea. A su vez, nuestra galaxia no es más que una de entre los cientos de miles de millones de estructuras similares que se calcula que existen en el universo observable, el cual se extiende 430.000.000.000.000.000.000.000 ($4{,}3 \cdot 10^{23}$) kilómetros en todas las direcciones del espacio.

Desde nuestro irrisorio punto de vista, hablamos de una cantidad inconcebible de materia y de espacio. En lo que respecta al tiempo, la especie humana surgió de la noche a la mañana en el último instante de la vasta historia cósmica. Y todo indica que el universo tiene por delante un futuro mucho más amplio, del que podremos formar parte o no. Ante semejante perspectiva, el afán por hallar nuestro lugar en el cosmos puede parecer una broma colosal. Hemos de ser muy estúpidos para pensar que algún día encontraremos algo que nos haga importantes.

Y, sin embargo, eso es lo que intentamos hacer, a pesar de nuestra aparente mediocridad. Esta se hizo evidente hace 500 años, cuando Copérnico expulsó la Tierra del centro del sistema solar. La idea dio lugar a uno de los principios rectores de la ciencia de los últimos

Traducido y adaptado de The Copernicus complex: Our cosmic significance in a universe of planets and probabilities, *de Caleb Scharf, por acuerdo con Scientific American/Farrar, Straus and Giroux.*



TIM BOWER

siglos y, hasta hoy, representa una guía fundamental en nuestro camino para discernir la estructura subyacente del cosmos y la naturaleza de la realidad.

A la hora de tasar nuestra importancia, nos enfrentamos a un dilema: algunos hallazgos y teorías parecen indicar que la vida constituye un fenómeno ordinario; otros, sin embargo, sugieren justo lo contrario. ¿Cómo organizar lo que sabemos sobre el cosmos —desde las bacterias hasta la gran explosión— para esclarecer si somos o no especiales? A medida que aprendemos más sobre nuestro lugar en el universo, ¿qué implicaciones surgen en nuestra búsqueda de vida más allá de la Tierra? ¿Qué pasos debemos dar?

Caleb Scharf es director del Centro de Astrobiología de la Universidad de Columbia y autor de *Gravity's engines: How bubble-blowing black holes rule galaxies, stars, and life in the cosmos* (Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2012).



LO QUE SABEMOS

En el siglo XVII, el comerciante y científico Antony van Leeuwenhoek se valió de sus microscopios artesanales y vio por primera vez microorganismos, un viaje que lo transportó al extraño mundo del microcosmos. Ese notable descenso por la escalera de las dimensiones físicas hacia el floreciente universo que llevamos dentro aportó uno de los primeros indicios de que los componentes de nuestro cuerpo, nuestras estructuras moleculares, se hallaban en uno de los extremos de todo un espectro de escalas biológicas. Antes de Van Leeuwenhoek, dudo que el ser humano tuviera oportunidad de reflexionar sobre este aspecto, salvo quizá de manera superficial.

En la Tierra viven organismos más grandes y pesados que nosotros; basta con fijarnos en las ballenas y los árboles. No obstante, nos encontramos mucho más cerca del límite superior de la escala biológica que de su extremo inferior. Las bacterias más pequeñas miden unos pocos cientos de milmillonésimas de metro; los virus más diminutos, unas diez veces menos. Nuestro cuerpo es entre diez y cien millones de veces mayor que los organismos más simples que conocemos.

Si consideramos los mamíferos terrestres de sangre caliente, nos hallamos también entre los más voluminosos, aunque algo lejos del máximo. En el extremo opuesto, nuestros parientes de menor tamaño son las musarañas enanas: diminutos pedacitos de carne y pelo de solo dos gramos de peso. Sobreviven en el límite de la viabilidad; su cuerpo sufre continuas fugas de calor de las que apenas pueden resarcirse comiendo sin cesar. Sin embargo, la mayoría de los mamíferos se encuentra más cerca de su tamaño que del nuestro. De hecho, la masa promedio de la población mundial de mamíferos apenas llega a los 40 gramos. Nuestro cuerpo, con toda su inteligencia y su complejidad celular, se sitúa en la frontera con la zona superior. En términos relativos, no hay muchos mamíferos mayores que nosotros. Existimos en la divisoria que separa la compleja diversidad de los organismos menores y las limitadas opciones de los más voluminosos.

Consideremos ahora nuestro sistema planetario. Algunas de sus características resultan poco comunes. El Sol no pertenece a uno de los tipos de estrellas más abundantes (la mayoría son menos masivas). En la actualidad, los planetas describen órbitas más circulares y separadas unas de otras que en la mayoría de los sistemas exoplanetarios. Además, entre nuestros vecinos no hay ninguna supertierra. Esta clase de mundos, más masivos que el nuestro, se hallan presentes en el 60 por ciento de los sistemas planetarios conocidos. Si fuéramos arquitectos cósmicos, consideraríamos nuestro sistema planetario un caso atípico, algo alejado de la norma.

Algunas de esas características derivan del hecho de que, al contrario que la mayoría de los sistemas planetarios, el sistema solar no ha sufrido ninguna reorganización dinámica completa. Eso no quiere decir que tengamos asegurado un futuro sin sobresaltos: las simulaciones de última generación indican que, en unos cientos de millones años, las órbitas del sistema solar podrían entrar en una fase más caótica. Y, dentro de 5000 millones de años, el Sol se hinchará y modificará de manera drástica las propiedades de los planetas.

Todo apunta a que también vivimos en una frontera temporal, en la transición que separa una fase de juventud estelar y planetaria de otra de progresiva decrepitud. Que existamos en este período de relativa calma no resulta, a posteriori, tan sorprendente. Así ocurre con otras tantas circunstancias. Habitamos un rincón del cosmos que no es demasiado frío ni demasiado caliente, donde la química no resulta demasiado inerte ni demasiado corrosiva, y que no se muestra demasiado inmutable ni demasiado voluble.

Hoy parece evidente que esa tranquilidad va mucho más allá de nuestro entorno galáctico. Si consideramos el cosmos en su conjunto, vivimos en un período muy posterior al rápido tumulto del universo joven y caliente. La formación de estrellas se está ralentizando en todo el cosmos. El ritmo medio al que se forman otros soles y sus planetas apenas llega al 3 por ciento del que tuvo lugar hace entre 11.000 y 8000 millones de años. Las estrellas comienzan a apagarse. Y, en términos cósmicos, hace tan solo 6000 o 5000 millones de años, la expansión del universo se estaba decelerando. Hoy el cosmos se encuentra, una vez más, en medio de una transición suave. La energía oscura, un producto del mismo vacío, ha comenzado ya a acelerar el crecimiento del espacio, lo que impedirá que en el futuro se formen estructuras cósmicas mayores. Eso significa que, en última instancia, la vida está condenada a un futuro de aislamiento y desolación en el seno de un universo cada vez más indescifrable.

Al juntar todos estos factores, queda claro que nuestra visión del universo interior y exterior es más que limitada. Nuestra

EN SÍNTESIS

La Tierra orbita alrededor de una de los cientos de miles de millones de estrellas de la Vía Láctea, una galaxia de tantas. Esta circunstancia encaja con el principio copernicano, según el cual ocupamos un lugar mediocre en el cosmos.

Sin embargo, nuestro planeta parece reunir un conjunto de características orbitales privilegiadas. Además, algunas constantes fundamentales de la naturaleza parecen ajustadas para permitir la existencia de los planetas y de la vida.

Para entender nuestra importancia o insignificancia cósmica, así como para evaluar la posibilidad de que en el universo existan otras formas de vida, los expertos habrán de reconciliar estas dos ideas aparentemente contradictorias.

Nuestra especie surgió de la noche a la mañana en el último instante de la vasta historia cósmica. Y todo indica que el universo tiene por delante un futuro mucho más amplio, del que podremos formar parte o no. Ante semejante perspectiva, el afán por hallar nuestro lugar en el cosmos puede parecer una broma colosal

extraña posición nos brinda una perspectiva muy estrecha. De hecho, nuestra intuición básica en lo referente a los sucesos aleatorios y nuestro desarrollo científico, basado en la inferencia estadística, podrían haber sido muy distintos en otras circunstancias de orden o desorden, de espacio y de tiempo. Y el hecho de que estemos tan aislados de cualquier otra forma de vida en el cosmos —hasta el punto de que aún no hemos topado con ninguna— ejerce un impacto muy profundo sobre las conclusiones que podemos extraer.

DEDUCCIONES

Gran parte de los indicios con que contamos apoyan el principio básico de la mediocridad copernicana. Pero, al mismo tiempo, otros detalles de nuestro entorno sugieren lo contrario. Algunos de ellos han conducido a la formulación del principio antrópico: la observación de que ciertas constantes fundamentales de la naturaleza parecen «finamente ajustadas» para situar el universo sobre la delgada línea que permite la existencia de un planeta como la Tierra y de la vida en él. Una ligera desviación hacia uno u otro lado, y el cosmos sería un lugar completamente distinto. Si modificásemos la intensidad relativa de la interacción gravitatoria, o bien no se formarían las estrellas —ni, por tanto, los elementos pesados—, o bien solo habría astros colosales que desaparecerían con rapidez sin dejar nada importante tras de sí: ni descendientes ni una senda hacia la vida. De igual modo, si alterásemos la interacción electromagnética, los enlaces químicos serían demasiado débiles o demasiado fuertes para dar lugar a la diversidad molecular que caracteriza la fantástica complejidad del cosmos.

¿Qué conclusión podemos extraer de tales contradicciones? Creo posible defender que los hechos nos empujan a adoptar una nueva idea científica sobre nuestro lugar en el cosmos. Una apartada tanto del principio copernicano como del antrópico y que, en mi opinión, bien podría convertirse en un principio por derecho propio.

Tal vez quepa llamarlo principio cosmocaótico, en referencia a la frontera entre el orden (el *kosmos* griego original) y el caos. Según él, la vida —y, en particular, la vida tal y como la conocemos en la Tierra— siempre se encontrará en la frontera de varios dominios definidos por características como energía, ubicación, escala, tiempo, orden y desorden. La estabilidad o el caos de las órbitas planetarias o las variaciones en el clima y la geofísica de un planeta constituyen manifestaciones directas de esas características. Si nos alejamos de la frontera en una u otra dirección, la balanza se inclina hacia una condición hostil. La vida como la nuestra requiere la combinación correcta de ingredientes, de calma y caos, de *yin* y *yang*.

Esa proximidad al límite permite cambios y variaciones, pero no hasta tal punto que resulten abrumadores. Hay paralelismos evidentes con el concepto de franja de habitabilidad de una estrella, según el cual los entornos planetarios moderados solo se alcanzan en un estrecho abanico de parámetros orbitales. Sin embargo, en lo que respecta a la existencia de vida, la zona acogedora puede ser mucho más dinámica. No tiene por qué estar fija en el espacio o en el tiempo, sino que podría constituir una cantidad multiparamétrica que constantemente se desvía, curva y retuerce, como las extremidades de un bailarín.

Si de veras nos hallamos ante un principio universal, podemos plantear posibilidades muy interesantes sobre nuestra trascendencia cósmica. A diferencia del punto de vista estrictamente copernicano, que enfatiza nuestra mediocridad y apunta a una gran cantidad de circunstancias similares en todo el universo, la noción de que la vida requiere una alineación de parámetros dinámica y cambiante reduce las opciones. Las oportunidades que esta nueva visión ofrece a la vida difieren también de las ideas antrópicas, que, en su versión más extrema, reducen la vida a un suceso único en el tiempo y en el espacio. Esta nueva regla identifica aquellos lugares donde la vida debería aparecer y su frecuencia potencial. Especifica las características necesarias para la vida en un espacio virtual de muchos parámetros y cartografía sus zonas fértiles.

Un principio como este no convierte necesariamente a los seres vivos en una parte especial de la realidad. Tal vez la biología constituya el fenómeno físico más complejo de este universo o de cualquier otro universo posible. Pero, probablemente, ahí acabe todo: una estructura natural muy intrincada y que solo surge cuando el orden y el caos concurren del modo adecuado. Y esta conceptualización de la vida en el gran esquema de la naturaleza nos conduce a resolver el rompecabezas que emana de los persuasivos, aunque nunca concluyentes, argumentos sobre su abundancia y su delicada escasez.

Léase una reseña de este libro en la página 89 de este mismo número.

PARA SABER MÁS

Just six numbers: The deep forces that shape the universe. Martin Rees. Basic Books, 2001.

Life, unbounded. Blog del autor: **blogs.scientificamerican.com/life-unbounded**

EN NUESTRO ARCHIVO

La vida en el universo. Steven Weinberg en *IyC*, diciembre de 1994.

El sino de la vida en el universo. Lawrence M. Krauss y Glenn D. Starkman en *IyC*, febrero de 2000.

Buscando vida en el multiverso. Alejandro Jenkins y Gilad Pérez en *IyC*, marzo de 2010.

La benevolencia de los agujeros negros. Caleb Scharf en *IyC*, octubre de 2012.



Un punto débil de la resistencia bacteriana

Los biólogos evolutivos intentan atacar a las bacterias con una nueva estratagema que consiste en desbaratar su vida social

Carl Zimmer

Rolf Kümmerli investiga en la Universidad de Zúrich nuevos fármacos para acabar con las infecciones mortíferas. Pasa la jornada en un laboratorio rodeado de placas de Petri y matraces con bacterias en cultivo. Pero la senda tomada por este investigador antes de llegar a su entorno actual de trabajo resulta extraña. En su época de estudiante universitario pasó años recorriendo a pie los Alpes suizos para examinar la vida social de las hormigas. No dirigió su atención a los microbios hasta después de recibir el título de doctor en biología evolutiva.

EN SÍNTESIS

Los investigadores de la naciente disciplina de la sociomicrobiología creen haber dado con una nueva estratagema para combatir las bacterias patógenas resistentes a los antibióticos.

En concreto, pretenden interrumpir los procesos de comunicación y cooperación bacterianos.

La teoría evolutiva predice que las bacterias difícilmente adquirirán resistencia a tales fármacos «antisociales». Sin embargo, esta nueva estrategia para crear antibióticos no convence a todo el mundo.

ZACHARY ZAVISLAK *(fotografía)*

No obstante, el camino que separa las hormigas de los antibióticos no es tan tortuoso como pudiera parecer. Hace décadas que se estudia la evolución de la conducta cooperativa en sociedades animales como las de las hormigas, donde un ejército de obreras estériles cuida los huevos de la reina. Una nueva rama de la ciencia, a veces denominada sociomicrobiología, está revelando que algunos de los principios que rigen la vida de estos insectos pueden aplicarse a las sociedades bacterianas. A semejanza de ellos, los microbios viven en comunidades complejas donde se comunican entre sí para obtener un bien común. Esta visión de la evolución social apunta a una nueva táctica para vencer las infecciones: en lugar de luchar contra un tipo de bacteria, como hacen los antibióticos tradicionales, se intenta atacar a las sociedades microbianas enteras.

Ahora más que nunca precisamos nuevas estrategias, puesto que las bacterias están generando una amplia resistencia a los antibióticos que nos está conduciendo a una crisis sanitaria. Según los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE.UU. (CDC), en ese país fallecen cada año 23.000 personas a causa de infecciones resistentes a los antibióticos. Y se conocen cepas del bacilo de la tuberculosis y de otros patógenos invulnerables a casi todo el arsenal disponible. «El problema resulta apremiante. Y hay razones para pensar que empeorará», afirma Anthony S. Fauci, director del Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas.

La respuesta habitual a esta crisis ha consistido en frenar la evolución de la resistencia y buscar nuevos fármacos para sustituir a los que iban perdiendo eficacia. Una solución estereotipada. Las bacterias desarrollan continuamente resistencia y seguirán haciéndolo a menos que hallemos una forma distinta de combatirlas. John Pepper, biólogo teórico en el Instituto Nacional del Cáncer de EE.UU., advierte que cada nuevo fármaco que aparece acaba por fallar, tarde o temprano. La solución inmediata de sintetizar uno distinto cada vez nos resuelve la papeleta unos meses, pero ya no basta.

Muchos tipos de bacterias infecciosas se sirven de su comportamiento colectivo para hacernos enfermar. Los sociomicrobiólogos buscan puntos flacos para trastocar sus sociedades, como dificultar su comunicación o anular sus esfuerzos de cooperación para recolectar nutrientes. La teoría evolutiva predice que el comportamiento colectivo de las bacterias debería ser un objetivo de la medicina. Alterar su vida social quizá no evite los fenómenos evolutivos, pero podría frenar de modo notable la aparición de resistencias.

Los sociomicrobiólogos tendrán que vadear ríos de escepticismo. A pesar de haber presentado argumentos teóricos fundados y datos experimentales halagüeños, ciertos especialistas dudan de que esos fármacos inspirados en la evolución logren poner coto a la resistencia. Y los laboratorios farmacéuticos, que en general han dejado de lado los antibióticos, aún no están listos para ultimar el proceso de desarrollo y lanzar tales medicamentos al mercado.

Aun así, los sociomicrobiólogos están logrando cierta atención. Los Institutos Nacionales de Salud (NIH) de EE.UU. planean investigar la resistencia a los antibióticos y los científicos consideran la vida social microbiana un objetivo prioritario. Si el trabajo da sus frutos, habrán conseguido revertir la relación entre la medicina y la evolución. Esta última, en vez de enemiga, se convertiría así en aliada en la lucha contra las bacterias nocivas.

MICROORGANISMOS OBSTINADOS

La crisis de la resistencia a los antibióticos se viene gestando desde hace mucho tiempo. Poco antes de la aparición de los primeros antibióticos a mediados del siglo xx, los médicos ya habían descubierto algunos tipos de bacterias que podían sobrevivir a sus efectos. En aquel momento no se tuvo clara conciencia de lo que estaba pasando, pero hoy conocemos con detalle los entresijos moleculares de la evolución de la resistencia.

La penicilina, por ejemplo, mata las bacterias porque secuestra una proteína involucrada en la construcción de su pared celular. Sin ella, los microorganismos sufren fugas y mueren. Las bacterias cuentan con bombas que expulsan las sustancias tóxicas de su interior. Y en una población microbiana puede surgir una mutante que produzca más bombas de lo normal, lo que le permitirá eliminar con rapidez la penicilina y conservar la proteína necesaria para construir la pared.

Ese tipo de mutaciones no suele reportar ninguna ventaja evolutiva al microbio. Pero si un paciente toma penicilina para acabar con una infección, las bombas de más adquieren de repente una importancia decisiva. Las bacterias que no las presentan mueren, mientras que muchas de las mutantes logran sobrevivir. Estas últimas se multiplican y refuerzan su presencia en la población y, en las generaciones venideras, sus descendientes pueden refinar aún más sus defensas, en ocasiones con la adquisición de genes de otras especies de bacterias.

Durante décadas los laboratorios farmacéuticos han descubierto y sintetizado nuevos fármacos con la suficiente rapidez como para sustituir a los que quedaban desfasados. Pero ahora la fuente se está secando. El alza de los costes de desarrollo de los nuevos antibióticos ha recortado los beneficios y muchos laboratorios han optado por abandonar su fabricación en favor de otros medicamentos más rentables contra el cáncer o la hepatitis.

Con el agravamiento de las resistencias, los científicos han renovado sus esfuerzos en busca de un antibiótico que no quedase obsoleto. Y a veces han creído dar con uno a prueba de adaptaciones evolutivas. En 1987, Michael Zasloff, por entonces en los NIH, descubrió que la rana africana con uñas (*Xenopus laevis*) segregaba en la piel un potente veneno antibacteriano. Él y otros investigadores no tardaron en averiguar que no solo los anfibios producían toxinas. Casi todos los animales que estudiaron sintetizaban pequeñas proteínas con carga positiva que mataban las bacterias, unas moléculas que han sido bautizadas como péptidos antimicrobianos.

En revistas científicas y en reportajes en la prensa, Zasloff auguró que las bacterias no generarían resistencia contra ese tipo de fármacos. Señaló que los animales segregan péptidos antimicrobianos desde hace cientos de millones de años y que las bacterias siguen siendo vulnerables a ellos. En 2003, Graham Bell, biólogo evolutivo de la Universidad McGill, advirtió de que Zasloff podía andar errado. La penicilina y muchos otros fármacos también proceden de fuentes naturales. Pero la medicina moderna los administra en concentraciones enormes y crea una tremenda presión selectiva que propicia la aparición de mutantes resistentes. En cuanto los médicos comenzasen a recetar comprimidos de péptidos antimicrobianos, la historia se volvería a repetir.

Zasloff retó a Bell a que demostrase que las bacterias lograrían adquirir resistencia contra el pexiganán, uno de los péptidos mejor estudiados. Bell y su entonces estudiante de posgrado Gabriel Perron cultivaron una cepa de *Escherichia coli* y la expu-

Carl Zimmer es columnista del *New York Times* y autor de varios libros de divulgación científica sobre biología y neurociencia.



EJEMPLO DE TRATAMIENTO

Lecciones de la biología evolutiva

Los investigadores esperan crear tratamientos antibacterianos que frenen los mecanismos de comunicación y cooperación de los microbios patógenos. En teoría este tipo de estratagemas generarían menos resistencia farmacológica porque ninguna célula bacteriana podría sacar provecho de modificar por sí sola su respuesta. A continuación se expone un tratamiento dirigido contra una molécula empleada por las bacterias *Pseudomonas* para sustraer hierro.

Diana: La obtención colectiva de nutrientes

Pseudomonas sintetiza un tipo de moléculas llamadas sideróforos que arrebatan el hierro a su anfitrión (*flechas azules*). Cada sideróforo es reutilizado por muchas células bacterianas, lo que lo convierte en un bien común y no privado.

SUMINISTRO

Sideróforo

P. aeruginosa

1 Liberación de sideróforos

Hierro

2a Los sideróforos arrebatan el hierro a moléculas del hospedador.

3a Las células bacterianas reabsorben los sideróforos (no los que han producido ellas, sino otros) y destinan el hierro a impulsar la división celular.

2b El galio, químicamente muy similar al hierro, se administra como fármaco; los sideróforos captan el galio en lugar del hierro.

Galio

PRIVACIÓN

3b Los sideróforos retornan a la colonia bacteriana cargados con galio y el crecimiento de las bacterias se paraliza porque no pueden usar este metal.

Estrategia: Sustracción de los bienes comunes

Los símbolos en magenta destacan una estrategia inspirada en la sociomicrobiología: trastocar el servicio prestado por un bien común. En este caso, la administración de galio socava la capacidad de los sideróforos para suministrar hierro a la población bacteriana. Por mucho que una célula desarrolle una mutación que mejore sus sideróforos, probablemente seguirá sin obtener hierro porque empleará los fabricados por otras bacterias.

JOHN GRIMWADE

sieron a una dosis baja de la sustancia. A continuación tomaron algunas de las bacterias supervivientes para iniciar una colonia nueva y la expusieron a una dosis más alta del fármaco. Con el paso de los meses, a medida que aumentaban la dosis, comprobaron que los microbios se volvían resistentes al pexiganán, tal y como había predicho Bell.

Zasloff reconoció de inmediato el error y dio todo el crédito a Bell. El experimento le hizo ser más prudente sobre estos péptidos. «Si algo sucede en un tubo de ensayo es muy probable que suceda en el mundo real», escribió Zasloff en *Nature*.

Hoy ignoramos si tal afirmación es correcta y no lo sabremos con certeza si no se autoriza el uso de los péptidos antimicrobianos contra las infecciones. En la actualidad, los laboratorios farmacéuticos llevan a cabo varios estudios clínicos, pero, 28 años después de su descubrimiento, no hay todavía ningún péptido aprobado para el uso clínico. Sufren las consecuencias del lento proceso de desarrollo de los fármacos.

COOPERACIÓN BACTERIANA

Charles Darwin tal vez ignorase por completo que las bacterias se convertirían en uno de los mejores ejemplos de la teoría de la selección natural. Él y otros científicos coetáneos sabían muy poco sobre el crecimiento de los microbios. Cuando en 1859 dio a conocer su teoría en *El origen de las especies,* se centró en los rasgos que resultaban familiares a sus colegas victorianos, como el pelo de los mamíferos y la coloración de las plumas.

Darwin también escribió sobre rasgos conocidos de la naturaleza que en un principio le hicieron vacilar en su convenci-

miento. Uno de ellos era la esterilidad de las hormigas obreras. Según su teoría, la selección natural nace de la competencia entre los individuos por sobrevivir y procrear. Pero estas hormigas parecen haber rehusado desde un buen principio a ello. En palabras de Darwin, su existencia parecía «insuperable y realmente fatal para toda la teoría».

Él sospechaba que la solución a la paradoja de la obrera radicaba en el parentesco. El hormiguero no es una mera aglomeración de extraños, sino más bien una familia multitudinaria. Juntas pueden engendrar más descendencia que si lo intentaran cada una por separado.

Las ideas de Darwin acerca de la cooperación han inspirado a generaciones de biólogos evolutivos el estudio de esta cuestión. Sin ir más lejos, Kümmerli emprendió su carrera científica por esa razón. Lo que le llevó a secuenciar el ADN de hormigas de distintas colonias para observar la influencia del parentesco en la conducta hacia las otras. La investigación era fascinante, pero también lenta y limitada. Y cuando se acercaba el momento de defender su tesis, conoció a algunos biólogos evolutivos que habían dejado los animales por las bacterias sociales.

A la mayoría de la gente las palabras «social» y «bacteria» no le parecen conceptos afines. Sin embargo, los microorganismos viven hacinados en comunidades donde la comunicación y la cooperación abundan. Tomemos como ejemplo la bacteria *Pseudomonas aeruginosa,* causante de graves infecciones pulmonares. Cuando una de ellas penetra en un hospedador, lanza moléculas señalizadoras que otros miembros de su especie captan por medio de receptores especiales. La liberación y la recepción de esas moléculas es un modo de informar al resto del grupo sobre la ubicación de uno mismo.

Si las bacterias perciben la presencia de un número suficiente de congéneres comienzan a cooperar para levantar un refugio. Segregan moléculas pegajosas que acaban formando un tapete en el quedan inmersas las bacterias. Esta biopelícula se adhiere al epitelio de los pulmones o de otros órganos. Inmersas en esta capa, las bacterias quedan resguardadas del ataque de las células inmunitarias.

Pseudomonas también coopera para obtener nutrientes. Los microbios no pueden crecer sin hierro, entre otros elementos; pero las células del cuerpo humano atrapan con avidez ese metal y lo mantienen retenido en la hemoglobina y otras moléculas. Para hacerse con él, las bacterias liberan sideróforos, unas moléculas que arrebatan átomos del preciado metal a nuestras moléculas. «Básicamente sustraen el hierro», explica Sam Brown, biólogo evolutivo de la Universidad de Edimburgo. Absorben los sideróforos cargados de hierro y lo asimilan para crecer.

El esfuerzo por conseguirlo es cooperativo, porque seguramente los sideróforos que el microbio capta habrán sido fabricados por alguno de sus millones de vecinos. «La aportación de cada célula bacteriana beneficia a la población entera, no solo a ella misma», asegura Pepper. Los teóricos de la evolución llaman a esas moléculas de un modo: bienes comunes. Favorecen a todos, en este caso a la comunidad microbiana, a diferencia de los bienes privados, que solo repercuten en las bacterias que los fabrican.

Los bienes comunes representan una paradoja darwinista. En teoría, la selección natural debería haber acabado con ellos. Los mutantes que no crean para sí bienes comunes pueden recurrir a los producidos por otros. Este desequilibrio podría dar a los oportunistas una ventaja evolutiva. El mutante que no sintetiza sideróforos podría obtener el hierro sin pagar el precio de su producción. Ello le permitiría multiplicarse con más celeridad



GRUPO ENEMIGO. La actividad conjunta de las bacterias *Pseudomonas aeruginosa*, visibles aquí en una imagen de microscopía electrónica, les permite provocar infecciones recalcitrantes.

STEVE GSCHMEISSNER, SCIENCE SOURCE

que las bacterias que cooperan y acabar predominando sobre ellas. Pero son los cooperadores los que dominan en especies como *P. aeruginosa,* no los aprovechados.

A mediados de la década pasada, un pequeño grupo de biólogos evolutivos comenzó a dirigir su atención a estas incógnitas sobre la vida social de las bacterias. La Universidad de Edimburgo se erigió en un centro de vanguardia de la sociomicrobiología, por lo que Kümmerli se dirigió a ella en 2007, aunque no comenzó de inmediato con sus experimentos. Los años dedicados al estudio de las hormigas no le habían preparado para el duro trabajo de la microbiología. Él y otros aspirantes a esta disciplina tuvieron que aprender sus técnicas específicas: cultivar las bacterias, evitar las contaminaciones en los cultivos, manipular sus genes y hacer experimentos. «Se tardan años en aprender todos los métodos. A veces los microbiólogos clásicos no nos tomaban en serio», asegura Kümmerli.

Pero con el tiempo han obtenido resultados. Empezaron a desvelar los trucos esgrimidos por las bacterias sociales para mantener a raya a los aprovechados. En colaboración con Brown, Kümmerli descubrió que *Pseudomonas* no produce sideróforos de forma continua; los genera en masa, pero a ráfagas. Una vez creadas las existencias suficientes de sideróforos, los reciclan. Los absorben, se quedan con sus átomos de hierro y vuelven a liberarlos al exterior. Gracias a su durabilidad, las bacterias no tienen que destinar demasiada energía a la síntesis de nuevos sideróforos que sustituyan a los antiguos. El reciclaje, pues, abarata el coste de la cooperación. También limita la ventaja de actuar como aprovechado.

A medida que los sociomicrobiólogos descubrían más pormenores de la evolución social de las bacterias, comenzaron a preguntarse si podían dar a sus descubrimientos una aplicación muy valiosa: la búsqueda de nuevos tipos de medicamentos antiinfecciosos.

PUNTO DE INFLEXIÓN

Desde la perspectiva de la biología evolutiva, todos los antibióticos actuales resultan equiparables. Todos atacan los bienes privados de las bacterias. Si un microbio muta para proteger sus propios bienes, acaba desplazando a los que no pueden hacerlo. La sociomicrobiología pone de relieve una diana distinta para frenar las infecciones. «En lugar de combatir las células

bacterianas de forma individual, fija como objetivo sus bienes comunes», explica Pepper.

La teoría de la evolución predice que las bacterias serán menos proclives a generar resistencia contra los fármacos que alteren los bienes comunes. Imaginemos que se inventa un fármaco que destruye los sideróforos; privados de hierro, los microorganismos morirían. Supongamos ahora que un microbio adquiere una mutación que protege sus sideróforos del fármaco. Con ello no conseguiría ventaja alguna. Las bacterias liberan colectivamente los sideróforos en el cuerpo del hospedador, por lo que las moléculas producidas por cada una se entremezclan. Cuando una célula absorbe un sideróforo cargado de hierro, a buen seguro que no es suyo. Así pues, las mutantes no pueden imponerse sobre sus congéneres.

Los sociomicrobiológos concibieron este argumento en el campo abstracto de las ecuaciones matemáticas y de las simulaciones informáticas. Pero, según Pepper, todo ese esfuerzo hubiera sido en vano si nadie se hubiera atrevido a demostrarlo. Tales experimentos están ahora en marcha. En fecha reciente, Kümmerli, Brown y sus colaboradores han estado ensayando un fármaco que tiene como objetivo los sideróforos. Estudios anteriores habían revelado que los fabricados por *Pseudomonas* atrapan el galio con la misma facilidad que el hierro. Los investigadores se preguntaron si sería posible emplear ese metal como fármaco para privar de hierro a las bacterias.

Para averiguarlo llevaron a cabo un experimento con orugas. Las infectaron con *Pseudomonas* y dejaron que la infección siguiera su curso en algunas, que acabaron muriendo. En cambio, las larvas infectadas que habían recibido galio se restablecieron sin excepción.

Una vez demostrado que el galio puede actuar como antibacteriano, se está llevando a cabo otra prueba para verificar si las bacterias desarrollan resistencia hacia él. La teoría evolutiva predice que no debería ser así. «Estamos expectantes ante este experimento evolutivo», confiesa Kümmerli. Él y sus colaboradores sabían perfectamente que otros medicamentos prometedores habían sido desbancados por el poder de la evolución. «Esperamos que no aparezcan adaptaciones», añade.

En ese nuevo experimento cultivaron *Pseudomonas* en un caldo que contenía hierro, pero donde este permanecía unido a moléculas que las bacterias no podían absorber. Los microbios necesitaban liberar sideróforos para arrebatar el elemento a esas moléculas y sobrevivir. En una serie de ensayos expusieron el cultivo a ciertos antibióticos habituales. Al principio, los fármacos frenaron con rapidez el crecimiento bacteriano. Pero al cabo de doce días de exposición, las bacterias habían adquirido una resistencia completa a los antibióticos.

Acto seguido, repitieron el experimento, pero esta vez añadiendo galio en lugar de antibióticos. El metal frenó drásticamente el crecimiento y al cabo de doce días los microbios seguían mostrándose tan vulnerables como al principio. Se confirmaban así las predicciones de los sociomicrobiólogos. Un fármaco que actuaba contra los bienes comunes había evitado que las bacterias adquiriesen resistencia.

Pepper, que no participó en el ensayo del galio, lo califica como un éxito resonante para la sociomicrobiología: «Creo que es justo el paso que necesitábamos dar. Espero que represente un punto de inflexión». Kümmerli espera que otros científicos comiencen a ensayar con el galio en ratones infectados y, quizás en pocos años, en humanos. Tales experimentos serían relativamente sencillos porque el galio ya ha sido estudiado a fondo en pacientes, como parte de diversos tratamientos médicos.

FÁRMACOS POTENCIALES

Los sideróforos constituyen solo uno de los bienes comunes que los sociomicrobiólogos están estudiando como dianas potenciales de medicamentos. Algunas bacterias liberan toxinas perjudiciales para nuestra salud. Pero solo lo hacen si son lo bastante numerosas para asestar un fuerte golpe. En tal caso. producen toxinas que revientan nuestras células para cebarse con los nutrientes desprendidos por estas. Los fármacos que logren desarmar las toxinas neutralizarían a las bacterias sin siquiera matarlas.

Otros expertos están examinando las señales que se envían entre sí las bacterias. Están descubriendo moléculas que pueden trastocar esa comunicación de diversas formas, como el bloqueo de los receptores que captan las moléculas señalizadoras. Si la comunicación bacteriana se interrumpe, la cooperación cesa.

Los fármacos antisociales podrían ofrecer otra ventaja frente a los antibióticos tradicionales: en lugar de erradicar numerosas especies bacterianas a la vez, permitirían apuntar mejor al objetivo. La razón estriba en que los bienes comunes fabricados por una especie solo suelen resultarle útiles a ella. De este modo, será menos probable que los fármacos antisociales eliminen los microbios beneficiosos al mismo tiempo que los nocivos.

Aunque esa investigación resulta prometedora, algunos científicos no ocultan su escepticismo ante la idea de que los fármacos antisociales eviten las resistencias. Thomas Wood, de la Universidad estatal de Pensilvania, y sus colaboradores han estado examinando algunos de estos compuestos fascinantes. Y sus resultados dan que pensar. En un experimento con un fármaco que interfiere la transmisión de señales, descubrieron bacterias mutantes que pueden crecer en presencia de este. En otras palabras, los microorganismos se las apañaron para vivir sin un bien común. «No he perdido la esperanza. Pero dudo de que este tipo de fármacos sea la panacea», matiza Wood.

Puede que sus resultados solo indiquen que algunos bienes comunes no son esenciales. De ser así, los medicamentos basados en la evolución tendrán que fijarse como objetivo únicamente los bienes que sí lo sean.

Pepper no descarta que los fármacos antisociales tan solo consigan frenar la resistencia, pero aun así supondrán un avance importante. «Estamos perdiendo la batalla y hay vidas en juego. Y aunque el margen ganado sobre nuestro oponente sea pequeño, salvaremos muchas vidas».

PARA SABER MÁS

Hacking into bacterial biofilms: A new therapeutic challenge. Christophe Bordi y Sophie de Bentzmann en *Annals of Intensive Care*, vol. 1, art. n.º 19; 13 de junio de 2011. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21906350**

Gallium-mediated siderophore quenching as an evolutionarily robust antibacterial treatment. Adin Ross-Gillespie et al. en *Evolution, Medicine, and Public Health*, vol. 2014, n.º 1, págs. 18-29, 2014. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24480613**

EN NUESTRO ARCHIVO

Razón y mecanismo de la comunicación bacteriana. R. Losick y D. Kaiser en *IyC*, abril de 1997.

La resistencia contra los antibióticos. Stuart B. Levy en *IyC*, mayo de 1998.

Películas bacterianas. J. W. Costerton y Philip S. Stewart en *IyC*, septiembre de 2001.

Mutación y resistencia a los antibióticos. F. Baquero, J. Blázquez y J. L. Martínez en *IyC*, diciembre de 2002.

Genética de la resistencia microbiana. G. Dantas, M. O. A. Sommer en *IyC*, agosto de 2014.

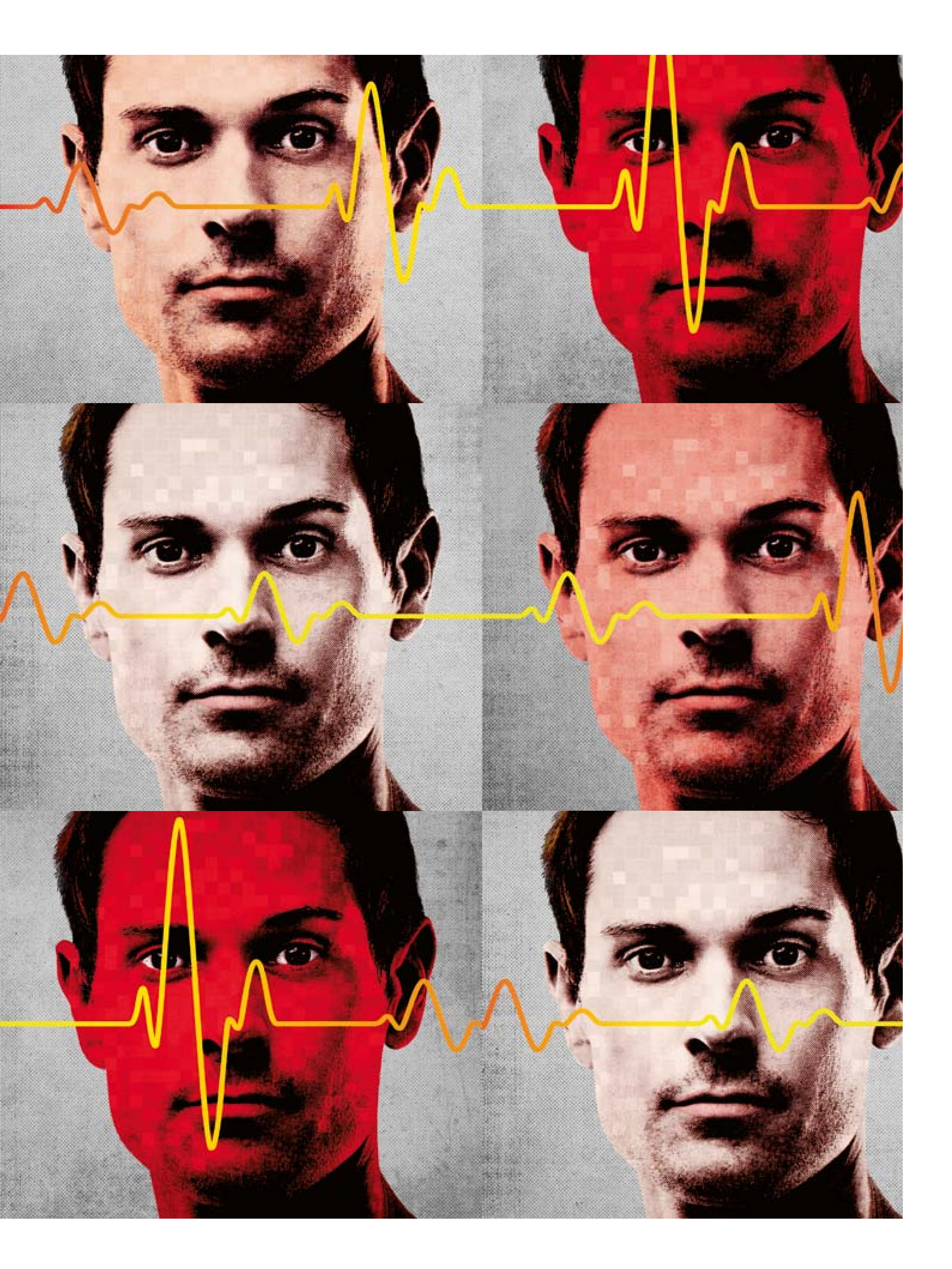


TECNOLOGÍA

Un microscopio — para el — movimiento

Una nueva técnica revela cambios minúsculos en objetos y personas que aparentemente se hallan inmóviles

Frédo Durand, William T. Freeman y Michael Rubinstein



Frédo Durand trabaja en fotografía computacional y es profesor de ingeniería eléctrica y ciencias de la computación en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT).

William T. Freeman, profesor de ingeniería eléctrica y ciencias de la computación en el MIT, estudia las posibles aplicaciones del aprendizaje automático a la visión artificial.

Michael Rubinstein, científico de Google, trabaja en visión artificial. Contribuyó al desarrollo del microscopio del movimiento mientras se hallaba en Microsoft Research y el MIT.



EN LOS SIGLOS XVI Y XVII, LOS PRIMEROS MICROSCOPIOS TRANSFORMARON LÁMINAS de vidrio que parecían totalmente transparentes en un universo que bullía de bacterias, células, granos de polen e intrincadas estructuras cristalinas. Eran los primeros aparatos que permitían demostrar a la gente la presencia de células en una gota de sangre. Desde entonces, los microscopios han abierto otros mundos invisibles a los científicos, que han podido adentrarse en las células o descender hasta la escala atómica.

Creemos que un nuevo microscopio está a punto de desvelar otro mundo fascinante y dinámico en el que se producen cambios ínfimos de color que el ojo no alcanza a captar. El rostro de una persona enrojece y palidece, alternativamente, por el pulso de la sangre; en las grúas de construcción, el viento puede provocar un balanceo casi imperceptible, y la respiración de un bebé a menudo es demasiado débil para apreciarse. Tales movimientos llegan a ser inimaginablemente pequeños, pero su importancia se antoja grande. Pueden indicar el estado de nuestra salud o poner de manifiesto vibraciones en una máquina esencial que está a punto de fallar. Con nuestros colaboradores hemos desarrollado lo que llamamos un «microscopio del movimiento», una herramienta que combina una cámara de vídeo con un algoritmo de cálculo especializado. Juntos amplifican las vibraciones de personas y objetos que, a simple vista, parecen hallarse en absoluto reposo.

CALCULANDO EL COLOR

Nuestro microscopio del movimiento fue descubierto de manera fortuita. Habíamos estado trabajando en un proyecto de vídeo para evaluar cambios minúsculos de color, demasiado pequeños para verlos a simple vista. En 2010, Ming-Zher Poh, Daniel McDuff y Rosalind W. Picard, del Laboratorio de Medios del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), habían demostrado que podían medir el pulso con una cámara de video, al detectar las variaciones ínfimas de color causadas por la sangre que circula por el rostro con cada latido del corazón. (Han convertido la técnica en una aplicación móvil llamada Cardiio para leer la frecuencia cardíaca.) Nosotros considerábamos que los cálculos eran enrevesados y más complejos de lo necesario, pues involucraban álgebra lineal avanzada, por lo que empezamos a buscar un modo de simplificar el proceso.

La principal dificultad radica en que el flujo sanguíneo origina una ínfima variación de color en cualquier píxel individual: tan solo un 0,2 por ciento en el transcurso de un latido. Por desgracia, los sensores de la cámara no recogen valores exactos y siempre contienen ruido aleatorio, normalmente superior al 0,2 por ciento. Estas interferencias eclipsan en gran medida los cambios en el tono de la piel.

En la búsqueda de un procedimiento más simple, y con la colaboración de Hao-Yu Wu, por entonces estudiante nuestro, John Guttag, investigador del MIT, y Eugene Shih, a la sazón en Quanta Research Cambridge, decidimos sustituir el número que representaba el color de cada píxel por un promedio de todos los píxeles cercanos. Este método redujo el ruido de forma notable, porque las fluctuaciones aleatorias tienden a anularse unas a otras si el grupo de píxeles es lo bastante grande. Además, eliminamos los cambios de color que ocurrían en un período más largo o más corto que el pulso típico en reposo de un adulto.

Nuestra estrategia logró relacionar las variaciones en los píxeles con el número de pulsaciones por minuto. Pero estos cambios de color resultaban invisibles a nuestros ojos, y queríamos saber cómo se verían. Al emplear este método para calcular las variaciones de color en cada píxel de un vídeo a lo largo del tiempo, y luego multiplicarlas por un factor de cien, logramos observar con claridad cómo el rostro de un hombre adulto se enrojecía cada vez que latía el corazón.

EN SÍNTESIS

Aun cuando parecen hallarse quietos, los objetos y las personas se mueven de manera imperceptible. Estos movimientos pueden ser tan pequeños, y tan importantes, como la respiración de un bebé.

Mediante la amplificación de los cambios de color que se producen de un momento al siguiente en los píxeles de un vídeo, se ha creado un «microscopio del movimiento» que hace visibles tales fenómenos.

Los movimientos aumentados pueden mostrar indicadores vitales de la salud, como alteraciones en el flujo sanguíneo, o vibraciones anómalas en la maquinaria pesada.

PÁGINAS ANTERIORES: SEAN McCABE

La técnica también funciona para bebés. En una prueba con recién nacidos llevada a cabo con los doctores Donna Brezinki y Karen McAlmon, ambos por entonces en el Hospital Winchester de Massachusetts, grabamos un vídeo con una cámara digital corriente. Tras la amplificación, descubrimos que las pulsaciones mostradas en las imágenes y las obtenidas con un pulsímetro tradicional acoplado a un dedito prácticamente coincidían. Esta observación abre la posibilidad de medir la frecuencia cardíaca sin contacto, lo cual tiene importancia en el caso de neonatos prematuros, ya que tocar a estos frágiles bebés puede causar lesiones. En adultos, tal visualización podría ayudar en el futuro a detectar irregularidades en el flujo sanguíneo, como asimetrías en la circulación entre los lados derecho e izquierdo del cuerpo.

UNA VIDA NO TAN ESTÁTICA

En nuestros vídeos, no obstante, se nos presentó un enigma. Para simplificar el procesamiento del color, habíamos pedido a los adultos situados delante de las cámaras que permanecieran muy quietos, y en los vídeos originales sus cabezas parecían estar realmente inmóviles. Sin embargo, al examinar los resultados de la amplificación de color, nos percatamos de que sus cabezas se movían. Nuestra técnica parecía acentuar no solo variaciones en el color, sino también movimientos minúsculos.

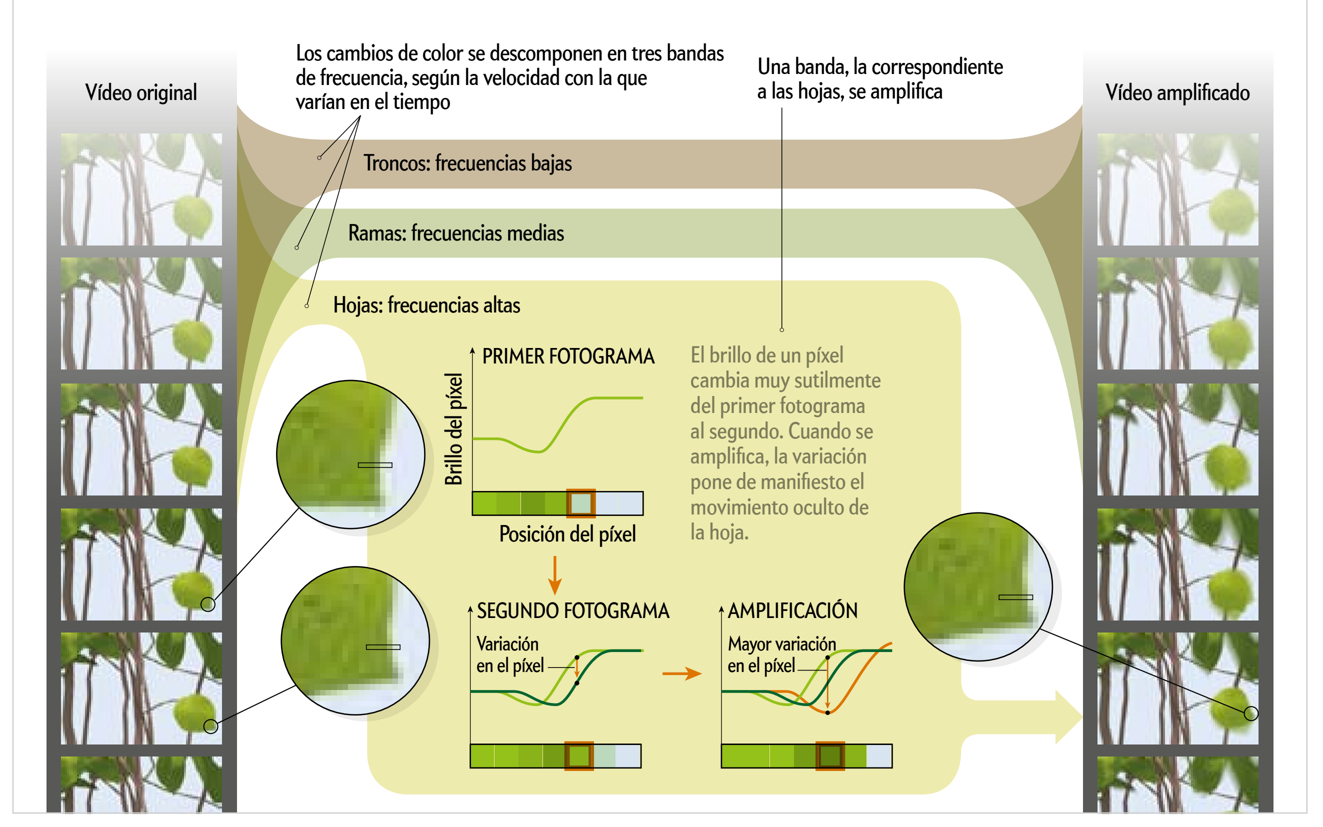
En un trabajo anterior con otros colaboradores habíamos creado vídeos que aumentaban los movimientos de pequeña amplitud. Sin embargo, para ello se requería el uso de un *software* especializado, que computaba direcciones de movimiento (vectores) para cada píxel en cada punto y los desplazaba a nuevas posiciones. Resultó ser una técnica complicada y propensa a errores. Así, nos sorprendió que nuestro nuevo enfoque consiguiera un efecto similar con operaciones sencillas, sin necesidad de calcular artificiosos vectores de movimiento.

¿Por qué los cambios de color mayores exageraban también las pequeñas vibraciones? Para averiguarlo, tuvimos que analizar en un vídeo cómo se producían variaciones locales de color como resultado del movimiento. Imaginemos un objeto, como una pelota, que es iluminado desde la derecha; el lado izquierdo quedará oscuro, y el derecho, más claro. Si la pelota surca volando una pantalla de izquierda a derecha, un píxel en una determinada posición de la imagen se irá oscureciendo a medida que transcurra el tiempo, puesto que representará puntos cada vez más a la izquierda de la pelota. La variación depende de la velocidad con la que se desplaza la pelota y de lo nítida que sea la transición de brillo entre el lado izquierdo y el derecho de esta, el denominado gradiente de color. En términos matemáticos, podríamos decir que la variación en el color de

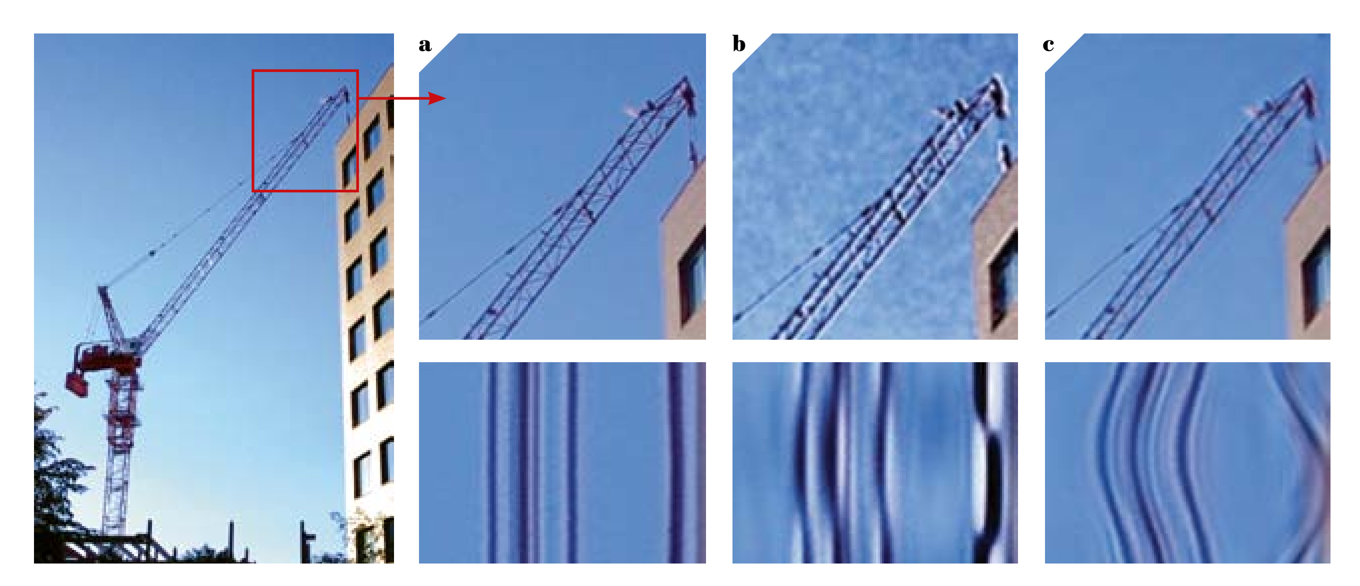
FUNDAMENTOS

Convertir los cambios de color en movimiento

En un vídeo, cada píxel representa un punto de un objeto dado, como una hoja o rama de un árbol. Al pasar el tiempo, el color de cada píxel cambia cuando la hoja se mueve, aunque sea un poco, porque su posición varía con respecto a la luz que la ilumina. Un programa informático que aumenta la variación de color entre un fotograma y el siguiente también exagera los movimientos pequeños y los vuelve visibles. Si se aisla y amplifica una frecuencia específica (como la velocidad con la que se agitan las hojas), tal movimiento se destacará en contraposición al resto del árbol.



JEN CHRISTIANSEN



LEVE OSCILACIÓN: Esta grúa de construcción parece inmóvil (*a*). La amplificación de los cambios de color en el vídeo revela balanceo, pero los píxeles se ven dentados (*b*). Un ordenador suaviza las transiciones entre píxeles, lo que hace perceptible el movimiento (*c*). Las imágenes inferiores muestran una sección de la grúa moviéndose a lo largo del tiempo.

CORTESÍA DE NEAL WADHWA, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS

un píxel a lo largo del tiempo es el producto de la velocidad del objeto por el gradiente de color.

Por supuesto, nuestro algoritmo no sabe nada de velocidades ni de gradientes. No obstante, puesto que amplifica el cambio de color en cualquier punto concreto a medida que la pelota se desplaza una fracción de centímetro a la derecha, también amplifica ese movimiento mínimo, lo que permite al ojo captarlo. De forma similar, los colores de los píxeles que representan puntos concretos en el pecho de un bebé se modificarán con su respiración, y al intensificar el cambio de color también se consigue resaltar los leves movimientos del pecho.

UN ASPECTO FLUIDO

Nuestro trabajo anterior, que usaba vectores, y la nueva estrategia, basada en las variaciones de color a lo largo del tiempo, difieren en una cuestión de perspectiva. Es la diferencia entre dejarse arrastrar por la corriente y quedarse parado en medio de ella; y ese cambio en el punto de vista es lo que simplifica los cálculos. La idea proviene de los científicos que analizan y modelizan el movimiento de los fluidos, para lo cual emplean uno de los dos métodos siguientes: el de Lagrange o el de Euler. En la descripción lagrangiana se sigue la trayectoria de una parte del fluido, como un observador en un bote siguiendo la corriente de un río. Por el contrario, la descripción euleriana se centra en un punto fijo en el espacio y estudia el fluido que pasa por él, como si el observador se encontrara apostado en un puente.

En nuestro trabajo previo adoptábamos una filosofía lagrangiana; hacíamos un seguimiento de los píxeles en el vídeo de entrada y luego los trasladábamos de acuerdo a vectores aumentados de punto a punto. En cambio, nuestra nueva estrategia considera las variaciones en el color tan solo en una posición fija. Esta perspectiva local es únicamente aplicable a movimientos pequeños, pero resulta mucho más simple y robusta. Con esta técnica, un ordenador puede procesar un vídeo con rapidez, mientras que nuestro trabajo previo requería mucho tiempo de computación y a menudo daba lugar a errores.

En 2012 publicamos un artículo sobre este nuevo método, llamado amplificación euleriana de vídeo, que mostraba cómo variaba el color de la piel debido al flujo sanguíneo o la cadencia respiratoria de un bebé. También grabamos un vídeo a alta velocidad de una guitarra con todas las cuerdas vibrando y seleccionamos bandas estrechas de frecuencias en torno a ciertas notas; por ejemplo, de 72 a 92 hercios para la sexta cuerda (mi), que vibra a 82 hercios. Con ello se conseguía resaltar el movimiento de esa única cuerda, mientras que las restantes parecían estar completamente inmóviles.

Creamos un sitio web para que la gente pudiera subir sus vídeos y aplicarles este proceso de amplificación (https://videoscope.qrilab.com). Los visitantes lo emplearon de formas en las que no habíamos pensado, lo que nos pareció fascinante. Un vídeo mostraba los movimientos del feto al final del embarazo; otro amplificaba la cadencia respiratoria de una mascota, un conejillo de indias; y otro revelaba los imperceptibles movimientos y expresiones de personas mientras procuraban mantenerse quietas.

No obstante, también descubrimos que nuestro enfoque euleriano adolecía de algunas limitaciones. Si un píxel de entrada se oscurece mucho entre un fotograma y el siguiente, el ordenador acentuará este cambio en exceso, generando un píxel negro, una especie de efecto de fuga. Ello puede dar lugar a halos oscuros o brillantes alrededor de las zonas en movimiento. Las variaciones en el color de entrada debidas al ruido de los sensores también suponen un reto, pues, aunque las suavizamos calculando la media de muchos píxeles locales, el ruido aún sale amplificado.

Ese resultado motivó que desarrolláramos un nuevo algoritmo que conserva las ventajas de las técnicas eulerianas simples y que, además, proporciona una mejor imagen cuando se producen cambios extremos.

Nos dimos cuenta de que las limitaciones de nuestro método original se debían a una suposición falsa. Este se comportaba como si la diferencia de color entre cada píxel y todos sus vecinos fuera la misma, lo que, por desgracia, no siempre ocurre. En los bordes, por ejemplo, existe una diferencia entre los píxeles mucho más grande (mayores gradientes) que en las áreas circundantes, más uniformes. Por tanto, si el valor de todos los píxeles se multiplica por la misma cantidad al mismo tiempo, se obtienen distorsiones que no denotan movimientos reales.

En vez de aplicar un aumento de la misma magnitud, decidimos representar matemáticamente cada segmento de una imagen

(un grupo local de píxeles) mediante una onda sinusoidal. Las pendientes de subida y bajada de esta onda indican variaciones rápidas, mientras que los picos y los valles reflejan cambios lentos. En una imagen de vídeo, los bordes de los objetos reproducen las partes rápidas y las zonas uniformes son similares a las partes lentas. Podemos representar el cambio a lo largo del tiempo en un área de la imagen como el cambio en la fase de la onda. La transición de una fase que cambia con rapidez a otra que lo hace lentamente nos ayuda a caracterizar el grado de movimiento que tiene lugar entre dos fotogramas de un vídeo y no crea efectos artificiales como los halos. Dimos a conocer este perfeccionamiento del método en 2013.

APLICACIONES DE LA INNOVACIÓN

Tras solucionar estos inconvenientes, descubrimos que podíamos procesar vídeos para observar movimientos infinitesimales que anteriormente solo se habían predicho con ecuaciones o mediante simulaciones informáticas. Un ejemplo lo ilustra el revestimiento que rodea el marco circular de una tubería de PVC. Cuando se golpea con un martillo, el material se dobla y recupera su forma siguiendo patrones específicos de oscilación a distintas frecuencias. Los patrones que vibran rápido están muy juntos, mientras que los que se mueven despacio son más anchos y fuerzan al revestimiento a adoptar diferentes formas. Estos patrones aparecen como ecuaciones en los libros de texto de ingeniería, pero observar las deformaciones reales en la tubería resultaba difícil debido a la pequeña amplitud de los cambios.

Grabamos vídeos a alta velocidad de tuberías al ser golpeadas. En el vídeo sin procesar apenas se aprecia alteración alguna en la forma circular. Justin Chen, estudiante del MIT que trabajaba en un proyecto con científicos de Shell International E&P, pasó las imágenes por nuestro microscopio del movimiento, dando instrucciones al ordenador para que extrajera los tres modos de oscilación de frecuencia más baja. Al amplificar dichas frecuencias vió cómo la sección transversal de la tubería se flexionaba hacia dentro y hacia fuera, lo que revelaba los movimientos reales.

Observar cómo se rompe una copa de vino por la presión acústica (una vibración de alta frecuencia) constituye otro ejemplo de la espectacularidad que puede alcanzar esta visualización. Todos hemos visto películas en las que una soprano da una nota aguda y hace añicos los cristales. Sin embargo, ninguno de nosotros había visto nunca la deformación real, ya que suele ser demasiado pequeña en amplitud y demasiado rápida, con una frecuencia típica de 300 a 500 hercios. Quisimos mostrar cómo se doblaba el cristal hacia dentro y hacia fuera en tiempo real.

Para conseguirlo, recurrimos a un viejo truco de Harold Edgerton, un pionero de la fotografía estroboscópica y la animación foto a foto (*stop motion*). Cuando un movimiento periódico rápido se graba con exposiciones cortas para cada fotograma, dicho movimiento se extiende por varios períodos entre fotogramas y parece mucho más lento. Utilizamos una cámara corriente para grabar ráfagas cortas de imágenes de la copa. Cuando amplificamos el vídeo con nuestro microscopio del movimiento, este tipo de efecto estroboscópico nos permitió ver vibrar un cristal frente a nuestros ojos tan pronto como recibía el impacto de la nota adecuada.

El fallo estructural de las copas de vino puede arruinar una cena, pero esperamos que el microscopio del movimiento permita revelar efectos más serios, como los fallos de máquinas grandes y potencialmente peligrosas. El microscopio detecta y hace visibles pequeños movimientos que pueden ser característicos de errores mecánicos. Ilustramos esta idea en un vídeo a alta velocidad de un coche con el motor al ralentí funcionando con normalidad. Al igual que en el caso de la tubería, en el vídeo sin procesar no se apreciaba que se moviera ninguna pieza mecánica. A continuación filtramos las imágenes para centrarnos en las vibraciones del motor a 22 hercios, anulando el resto de frecuencias. Al aumentar los cambios filtrados en un factor de 30, se descubrió que diferentes componentes del motor se sacudían de un lado a otro. No se trata de un hecho infrecuente en un motor, pero demuestra que el microscopio del movimiento tiene la capacidad de identificar bandas específicas que podrían ser anómalas. Estos vídeos servirían para ayudar a diagnosticar averías en piezas mecánicas de máquinas rotatorias o vibratorias.

Empleamos una aproximación similar para enseñar cómo se balanceaba una enorme grúa de construcción a causa del viento. Aunque a los observadores pueda parecerles rígida, nuestro microscopio demuestra que en verdad oscila. Hay un régimen de movimiento normal admisible, pero si se excediera, aparecerían problemas. Estamos explorando la monitorización de estructuras con los científicos de Shell Dirk Smit y Sergio Kapusta.

También es posible invertir el proceso. Usando el microscopio para resaltar vibraciones minúsculas en objetos como las hojas de una planta, hemos reconstruido el tipo de sonido que provoca su agitación. Si este método se aplicara a la rampa de cemento de una terminal de autobuses, se podría identificar el origen de las vibraciones que pueden debilitar la estructura.

Nuestro microscopio también sirve para descubrir problemas en el movimiento de fluidos. Cuando un flujo suave y uniforme de aire o agua en dos capas adyacentes se convierte en una mezcla turbulenta, puede formarse una onda inestable en el lugar donde las dos capas coinciden. Cuando esto sucede alrededor de un vehículo, tiene consecuencias drásticas sobre su velocidad. Por tanto, el estudio de este efecto reviste un enorme interés. Las ondas no se perciben en el vídeo sin procesar, pero al aumentar ciertas frecuencias en un factor de 40 en nuestro microscopio, las señales de inestabilidad saltan a la vista.

Emplear el *software* para revelar lo invisible puede parecerse a ponerse unas gafas mágicas o adquirir de repente una visión sobrehumana. Sin embargo, no se trata de magia ni del sueño de un creador de cómics; es el resultado de investigaciones básicas en el campo del procesamiento de vídeo y la representación matemática de imágenes. Ya nos ha mostrado fenómenos que conocíamos a nivel teórico pero que nunca habíamos visto con nuestros propios ojos. Podría, al igual que los primeros microscopios ópticos de hace siglos, ayudar a identificar amenazas para la salud y la seguridad. Ahora mismo nos hace sentir como exploradores maravillados ante un nuevo mundo de fenómenos ocultos que han estado siempre a nuestro alrededor.

PARA SABER MÁS

Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world. Hao-Yu Wu et al. en *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2012*, vol. 31, n.º 4, art. 65, julio de 2012. Versión preliminar disponible en **people.csail.mit.edu/mrub/vidmag**

2012 international science & engineering visualization challenge en *Science*, vol. 339, págs. 518-519, febrero de 2013. **www.sciencemag.org/content/339/6119/518.full**

EN NUESTRO ARCHIVO

La visión por humanos y máquinas. Tomaso Poggio en *IyC*, junio de 1984.

por Rosa Trobajo y Carles Ibáñez

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

La mosca negra en el río Ebro

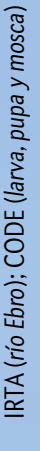
Un indicador del estado de salud del ecosistema fluvial

La mosca negra es un insecto de distribución mundial que puede suponer un verdadero azote para el ganado y las personas cuando se presenta en elevadas densidades, ya que sus picaduras son muy molestas y a menudo requieren tratamiento médico. Su ciclo biológico se desarrolla mediante una metamorfosis completa (huevo, larva, pupa y adulto) y está estrechamente ligado a los cursos de agua, lugar donde tienen lugar las tres primeras fases.

En la última década se ha detectado un aumento considerable de sus poblaciones en numerosos ríos catalanes, en particular de la especie *Simulium erythrocephalum*, una tendencia que se ha extendido hace poco a otras partes de la península. En el tramo final de los ríos Ebro, Segre y Cinca la proliferación de la mosca ha sido espectacular. En el Ebro tal explosión guarda una estrecha relación con la mayor transparencia del agua en los últimos tiempos, la cual ha desencadenado el crecimiento masivo de plantas acuáticas sumergidas, sobre todo de *Potamogeton pectinatus*. Estas plantas ofrecen un hábitat ideal para la mosca negra, que se fija en ellas en las primeras fases de su desarrollo.

Antes de la construcción de los embalses de Mequinenza y Ribarroja a finales de los años sesenta del siglo pasado, las aguas solían ser turbias debido a la alta concentración de sedimento; ello impedía la penetración de la luz hasta el lecho fluvial y, por consiguiente, el desarrollo de plantas. Después, entre los sesenta y ochenta, los embalses regulaban el caudal del río y retenían más del 95 por ciento del sedimento. Pero ello coincidió con un incremento de aportes de nutrientes al río (debido al aumento de la población y de las actividades agrícolas e industriales) que favorecieron el crecimiento de fitoplancton. Este fue el responsable del color verde de las aguas del tramo final del Ebro entre los años setenta y noventa; y también evitaba que la luz llegara al lecho fluvial. Desde finales de los noventa, la implantación de sistemas de depuración de las aguas residuales ha conllevado una mejora de la calidad de las aguas del río. En concreto, ha disminuido la concentración de fósforo, lo cual ha frenado la proliferación de fitoplancton. Ello ha supuesto una clarificación de las aguas y la entrada de luz hasta el lecho, lo que ha propiciado el crecimiento masivo de plantas acuáticas y, a su vez, de la mosca negra. En definitiva, la cascada de cambios observados en el ecosistema fluvial del Ebro constituye un interesante ejemplo de los efectos del cambio global en nuestros ríos.

—Rosa Trobajo y Carles Ibáñez
Programa de Ecosistemas Acuáticos
Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias
San Carlos de la Rápita, Tarragona





LAS LARVAS presentan unos apéndices filtradores con los que captan los nutrientes del agua. La lucha biológica contra la mosca, que se realiza aplicando al río la bacteria *Bacillus thuringiensis*, tiene como objetivo precisamente sus larvas.

LA FASE ADULTA de la mosca negra, de unos 3 a 5 milímetros de largo, es la única que vive en el medio aéreo. Aquí genera molestias a humanos y animales, ya que las hembras necesitan ingerir sangre para poder llevar a cabo la maduración de sus huevos antes de depositarlos en los cursos de agua.

EN EL RÍO EBRO ha proliferado la planta acuática *Potamogeton* en las últimas décadas (*página opuesta*). Esta ofrece un soporte ideal a la mosca negra en sus primeras fases de desarrollo, como a esta pupa (*izquierda*).

por Juan Arana

Juan Arana es catedrático de filosofía en la Universidad de Sevilla y miembro de la Real Academia de Ciencias Morales y Políticas.



Cuando la ciencia se separó de la filosofía

A partir de un tallo común, la escisión se produjo en tiempos de Newton y Kant

Una anécdota que intenta caracterizar el temperamento inglés cuenta que antaño, cuando las inclemencias meteorológicas interrumpían el tráfico marítimo en el canal de la Mancha, los londinenses decían: «¡Qué aislado se queda el Continente!».

En el caso de las relaciones entre ciencia y filosofía, también habría que preguntar quién se separó de quién. ¿Es la filosofía el viejo tronco del que brotó la rama joven de la ciencia? No habría que darlo por descontado. El primer filósofo, Tales de Mileto (s. VII-VI a.C.), se preguntó por el origen de todas las cosas, lo cual cuadra con las preocupaciones del metafísico, pero también determinó la fecha de un eclipse de sol e ideó un procedimiento para medir la altura de las pirámides, cometidos más propios hoy del científico. Ciencia y filosofía se mezclan indisceniblemente en la especulación presocrática.

Más que el renuevo en el viejo árbol, resulta apropiada la imagen de un solo tallo que se bifurca en dos vástagos gemelos, aunque pronto divergentes. Lo que siempre aunó ciencia y filosofía fue, por un lado, la pretensión de conseguir el conocimiento que está al alcance de nuestra aptitud natural y, por otro, el imperativo de comunicarlo de la forma menos recóndita posible. En lo primero se distinguen, por ejemplo, de la religión; en lo segundo, del esoterismo. Durante un tiempo fueron innecesarias otras precisiones; por eso ambas escribieron una historia común.

Sobre interpretaciones es dificilísimo decir la última palabra, pero lo cierto es que hay parentesco, ya sea de hermandad o de filiación. Yo apuesto por la hermandad, entre otros motivos, porque la separación no fue repentina ni radical, sino que se produjo a través de un proceso lento y lleno de vaivenes. Nadie discute, por ejemplo, que Aristóteles (s. IV a.C.) tiene perfil de filósofo; no obstante, el número de investigaciones empíricas que realizó es enorme, incluido el que muchos consideran primer experimento científico de todos los tiempos: estudió el desarrollo embriológico del pollo, incubando un grupo de huevos fecundados y abriéndolos en todas las fases de su desarrollo.

Y no se trata tan solo de un dato de primera época. El *Discurso del método* de Descartes (s. XVII), obra clave de la filosofía moderna, es un simple prólogo a un grupo de ensayos sobre geometría, óptica y meteorología. En una de sus primeras obras, Kant (s. XVIII) propuso una hipótesis plausible para explicar el origen del sistema solar e incluso avanzó una estimación del período de rotación de Saturno. Los ejemplos se podrían prodigar incluso hasta nuestra época. De igual forma, quienes son tenidos por científicos, empezando por Galileo o Huygens, y terminando por Schrödinger o Penrose, tampoco se recataron a la hora de abordar cuestiones de largo alcance que no tenían forma de dirimir mediante observaciones.

La pretensión de separar con nitidez ciencia y filosofía tropieza con la indisciplinada transversalidad de las figuras más descollantes de ambos gremios. Pero puede intentarse. Precisamente hay toda una corriente filosófica (el positivismo y sus prolongaciones) que se propone conseguirlo. Durante más de un siglo, sus adherentes se aplicaron a ello y, con menos connotaciones sectarias, lo han seguido haciendo los filósofos de la ciencia. Es el problema del criterio de demarcación, uno de los más arduos que hayan sido abordados por los estudiosos del conocimiento. Sencillamente, no parece que haya un fundamento objetivo, universal e intemporal para decidir dónde abandona uno el terreno de la ciencia positiva para adentrarse en el de la filosofía especulativa. En el mejor de los casos, aparece un amplio terreno intermedio donde se encuentran precisamente las cuestiones más vivas y fascinantes tanto de la ciencia como de la filosofía.

¿Significa esto que nos hallamos ante una tarea abocada al fracaso? No más que la de decidir dónde termina la física y empieza la química, o cuándo esta última se transforma en biología (a otra escala, ¿cuáles son los límites que separan la física nuclear de la de partículas, o la astrofísica de la cosmología?). Las fronteras entre las disciplinas son porosas. Probablemente no haya que lamentarlo, puesto que también ellas necesitan respirar.

El problema se vuelve menos ingrato si en lugar de legislar *sub specie aeternitatis* sabemos conformarnos con criterios históricos y aceptamos que la distinción entre ciencia y filosofía es una cuestión fáctica, que podría haberse materializado de otro modo y con una cronología diferente. El motor que impulsó su separación recíproca fue un elemental principio de diversificación, secuela necesaria del progreso del saber. La ruptura de la unidad del saber tenía que producirse inevitablemente tras la constitución de escuelas de pensamiento (como la pitagórica, la aristotélica o la hipocrática) porque a partir de entonces se aplicaron criterios de productividad y división del trabajo en la investigación. Si una persona o un grupo se reconocen incapaces de asimilar toda la información disponible, por fuerza habrán de elegir. Y entonces la opción más razonable es efectuar una agrupación temática, que suele llevar aparejada una especialización metodológica. El tema determina el método, aunque, en ocasiones, también ocurre a la inversa.

Entre los científicos-filósofos pioneros —digámoslo así para no precipitar



EN LAS RECIÉN FUNDADAS academias del siglo XVII, ciencia y filosofía todavía estaban hermandadas.

La Academia de Ciencias y Bellas Artes (1698), grabado de Sébastien Leclerc. The Elisha Whittelsey Collection, The Elisha Whittelsey Fund, 1962/Wikimedia Commons/Dominio público

conclusiones—, la primera agrupación temática tuvo que ver con el estudio de la posición y movimiento de los astros. La especialización metodológica consistió en potenciar el uso de la geometría, ya que el observador celeste se limita a medir ángulos y conjeturar puntos, líneas y figuras. Como no todo el mundo tiene aptitud para e inclinación hacia la matemática, es natural que se desinteresaran de estos asuntos quienes carecían de tal competencia. En un pasaje de su obra *Acerca del cielo* (291a), Aristóteles menciona «los escritos de astronomía», lo cual sugiere que a la sazón ya eran reconocidos como un género aparte. Sus autores eran matemáticos como Eudoxo y Calipo. Aristóteles nunca brilló en este tipo de trabajos, pero sí buscó el acuerdo con ellos, hipotecando su física al modelo de esferas concéntricas que acababa de ser desarrollado.

El conflicto surgió cuando, cuatro siglos después, Claudio Ptolomeo (s. II d.C.) perfeccionó un modelo astronómico de esferas excéntricas incompatible con el de Eudoxo y, por tanto, con la física aristotélica. ¿Podría interpretarse esto como la primera brecha socialmente reconocida dentro del saber racional? Ciertamente, pero en este contencioso no se enfrentaban el científico y el filósofo, sino este último y el matemático. El filósofo reclamaba competencias tanto para la física como para la metafísica, mientras que la matemática se concebía como un saber puramente abstracto o, en todo caso, apuntaba a un hipotético mundo inteligible más allá del alcance de los sentidos. De ninguna manera cabe, pues, valorar esta división como un primer distanciamiento entre ciencia y filosofía: ambas disciplinas todavía —y por muchos siglos— seguirían yendo de la mano.

La solución que se encontró fue segregar de las competencias del físico-filósofo los aspectos matematizables de la realidad y constituir con ellos un heterogéneo grupo de saberes (astronomía, óptica, música, estática e incluso teoría de las fortificaciones) bajo la ambigua rúbrica de la matemática aplicada. Estos saberes contemplaban solo aspectos tangenciales del universo sin genuina relevancia teórica; no servían para llegar a la verdad, únicamente para «salvar los fenómenos».

Esa especie de juicio salomónico se aceptó durante más de mil años, a pesar de lo artificioso que resultaba separar la verdad de sus manifestaciones sensibles. Hay que atribuir a Copérnico (s. XVI) y a otros sabios modernos la impugnación de la sentencia. Pero lo que reclamaron (y consiguieron) no fue el distanciamiento de lo científico y lo filosófico. Reivindicaban la reunificación de la matemática aplicada con el resto de la filosofía. En frase memorable de Galileo, contenida en *Il Saggiatore* (1623), la Naturaleza es un «libro» escrito en caracteres matemáticos. Él y otros investigadores de aquel siglo pretendían un saber más unificado que antes. Sin embargo, el resultado fue que, en vez de conformarse como hasta entonces con unas migajas, la inspiración matemática reclamó la parte del león en el estudio del universo. En adelante, la física se transformó en física-matemática, pero sin dejar de ser una física filosófica.

Tal fue al menos el proyecto de René Descartes: reunir en un solo corpus teórico el rigor de la matemática y la universalidad de la metafísica con la inmediatez y el poder transformador de la física. Que la ciencia y la filosofía hayan sido reconocidas como dos disciplinas independientes no es más que una consecuencia del fracaso del proyecto cartesiano. Fracaso parcial, sin embargo, porque su influjo fue poderosísimo. Pero ya los primeros cartesianos, como Henri du Roy, prefirieron descabezar la física del maestro y dejaron a un lado su proemio metafísico. Luego vinieron sabios, como Huygens o Mariotte, que apostaron por una fundamentación crecientemente matemática y empírica, aunque fuera a costa de marginar cualquier intento de totalización filosófica. El respaldo definitivo a la separación lo dio Newton, cuya filosofía natural era refractaria a empresas teóricas de gran estilo. Prefería entrar en diálogo con la teología y la religión antes que con una racionalidad escuetamente metafísica. Kant intentó dar carta de naturaleza a este «arreglo» por medio de su *Crítica de la razón pura* (1781). Propuso cercenar las aspiraciones teóricas de la filosofía especulativa y poner cimientos epistemológicos bajo el suelo de la ciencia empírico-matemática. Ninguna de las dos partes aceptó la fórmula: los científicos se sentían lo bastante seguros como para rechazar la tutela —que siempre conlleva alguna hipoteca— de los epistemólogos; los filósofos se resarcieron de la pérdida de jurisdicción sobre lo empírico tratando de monopolizar la especulación reflexiva.

Así fue como los dos saberes, ciencia y filosofía, empezaron a darse la espalda. Si hubiera que decidir cuál de los dos se situó más en línea de continuidad con lo que durante tanto tiempo había sido un proyecto común, mi opinión es que los más fieles a la idea griega de filosofía no han sido los que heredaron la palabra que la nombra.

PARA SABER MÁS

Sōzein ta phainomena. Pierre Duhem. University of Chicago Press, 1969.
Le développement de la physique cartésienne, 1646-1712. Paul Mouy. Arno Press, 1981.
Grandes experimentos científicos. Rom Harré. Labor, 1986.
Kant's philosophy of science. E. Watkins y M. Stan en *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2014.
Newton's philosophy. A. Janiak en *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2014.
El proceso histórico de separación entre ciencia y filosofía. Juan Arana. Real Academia de Ciencias Morales y Políticas, 2015.

por Reinhard Werner



Reinhard Werner es profesor de física teórica en la Universidad Leibniz de Hannover.

La tiranía del factor de impacto

Al someterse al poder de la bibliometría, los artículos científicos pierden utilidad

¿Cómo distinguimos a un buen científico? Hay toda una industria, la bibliometría, que quiere que creamos que es fácil: contad los artículos que ha publicado en revistas científicas, clasificadlos según el factor de impacto de estas y contad todas las citas de esos trabajos. Los políticos y los administradores parecen especialmente inclinados a esa forma de evaluación. Pero también son muchos los científicos que la aceptan y se valen de ella a la hora de cubrir plazas o asignar fondos.

La premisa que subyace a la bibliometría es la de que, al citar, los científicos participan en una encuesta incesante con la que eligen los mejores artículos académicos. Pero ¿cuáles son las verdaderas razones por las que citamos? Sobre todo, para remitir a los resultados de otros, a nuestros trabajos anteriores o a un método; para reconocer resultados parciales que persiguen el mismo objetivo; para justificar terminologías; para indicar lecturas que fundamentan las ideas menos conocidas; y, a veces, para criticar. También hay razones menos honorables: mejorar las estadísticas de citas de un amigo, halagar a un pez gordo que quizás evalúe un trabajo nuestro algún día o dar la impresión de que hay un colectivo interesado en el tema de que se trate, para lo que se hincha la introducción con citas a todo el mundo que no vienen a cuento y que en ocasiones se han reciclado de artículos anteriores.

Ninguna de esas formas de citar expresa la opinión de que el artículo en cuestión sea un logro científico destacable. En consecuencia, los artículos más citados son a veces los que se refieren a conceptos o métodos populares, pero no necesariamente importantes.

Qué duda cabe de que cubrir puestos académicos a partir de clasificaciones bibliométricas da mejor resultado que arrojar una moneda al aire, pero ello no distingue entre quienes sacan adelante creativamente un programa de investigación y quienes pergeñan rutinariamente artículos sobre una angosta subespecialidad que se ha puesto de moda.

Muchos de los efectos negativos de la bibliometría no vienen de que se la use, sino de que se espere que se usará. Cuando creemos que se nos juzgará conforme a criterios tontos, nos comportamos como tontos. Una buena muestra de ello es la distorsión del panorama de las revistas científicas —y los cambios subsiguientes en el estilo de los artículos— que se produjo cuando el factor de impacto empezó a tomarse en serio como equivalente de la reputación.



Cuando *Physical Review Letters* (*PRL*) se segregó de *Physical Review*, la intención era publicar más deprisa comunicaciones breves, que antes se remitían (sin tener que pasar la revisión por pares) a las cartas al director de *Physical Review*. Al ser más fácil conseguir impacto con ese formato, la reputación se trasladó a la nueva revista. Un artículo corto no tiene por qué ser científicamente mejor que uno largo, pero muchos autores están hoy más que dispuestos a mutilar su trabajo para que no sobrepase el límite de páginas de *PRL*, y eso aunque pierda legibilidad y utilidad.

Otro ejemplo. Puesto que los científicos dedicados a las ciencias de la vida son más numerosos que los físicos y, además, hacen más citas, los factores de impacto de *Science* y *Nature* (publicaciones que cubren todas las ciencias) baten de lejos a los de cualquier revista de física que no se dedique a publicar revisiones de materias específicas. Ello ha hecho que *Nature* se convierta en la revista más importante para los físicos experimentales. Sin embargo, no hay razón alguna por la que un artículo escrito para un público amplio tenga que ser más valioso científicamente que uno que efectúe un análisis técnico en profundidad. De hecho, cuando se dirigen a un público así, los autores suelen omitir las partes más peliagudas, prescinden de términos técnicos en el título y exageran las conclusiones, enunciándolas con menor precisión.

¿Qué podemos hacer? Muy simple: los científicos debemos resistirnos a la tentación de convertir la bibliometría en el pilar de nuestras decisiones. Y debemos hacerlo públicamente. En los anuncios de vacantes podemos afirmar que los artículos se juzgarán por su mérito científico y no por el factor de impacto de la revista donde se hayan publicado. Y al escoger candidato, no lo justifiquemos ante los administradores por sus estadísticas bibliométricas.

La tiranía de la bibliometría está ejerciendo otro efecto desastroso en los jóvenes. Para hacer el doctorado, un alumno mío de máster se cambió a un centro de gran renombre, que, como muchos, presume de su rendimiento teniendo en cuenta sus publicaciones en revistas de alto impacto. Le dijeron: «Si no puedes redactar tus artículos de una forma adecuada para *Nature*, *Science* o *PRL*, ni te molestes». ¿Es este el modelo de ciencia que queremos para nuestros futuros investigadores?

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 517, pág. 245, 2015. Traducido y adaptado con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullipedia.

La impresión en 3D llega a la cocina

La fabricación digital abre nuevos caminos a la gastronomía personalizada

La fabricación de objetos tridimensionales mediante la adición de capas, o impresión en 3D, constituye una técnica cada vez más consolidada en el ámbito de la ingeniería, sobre todo en la industria de componentes [*véase* «¿Imprimiremos casas en el espacio?», por Joaquim Minguella Canela; Investigación y Ciencia, enero de 2015].

Otros campos de aplicación de esta técnica corresponden al diseño, la arquitectura, la joyería y, muy especialmente, la medicina. En este último ámbito, la personalización de prótesis permitirá en un futuro próximo una adaptación perfecta al paciente. Asimismo, una vez escaneadas y reproducidas, las prótesis podrán ser utilizadas para diagnosticar o para simular intervenciones quirúrgicas, lo que permitirá un entrenamiento de gran valor formativo.



También la gastronomía comienza a beneficiarse de las aplicaciones de esta técnica. Una de las primeras propuestas basadas en la impresión —si bien todavía no era en 3D— se presentó en el año 2005, en el marco del VII Congreso Lo mejor de la gastronomía, celebrado en San Sebastián. Allí, Homaro Cantú, del restaurante Moto en Chicago, propuso lo que él llamaba *Hamburguesa a la brasa*. Primero cocinó la hamburguesa y luego la fotografió con una cámara digital. A continuación, mediante una impresora modificada para uso alimentario, imprimió sobre un papel comestible la imagen del plato.

Un avance más se produjo en Inglaterra, donde Yu Wen Chen y Malcolm Robert Mackley, de la Universidad de Cambridge, publicaron en febrero de 2006 en *Soft Matter*, revista de la Real Sociedad de Química, «Chocolate flexible», un artículo de revisión en el cual demostraban que la extrusión en frío permitía obtener flexibilidad en el chocolate y, por tanto, formas tridimensionales inusuales.

En 2010, Ian Jeffrey Lipton, de la Universidad Cornell, lideró los trabajos para la construcción de una impresora de alimentos en 3D como parte del proyecto Fab@home. En el prototipo se cargaban alimentos crudos y en el momento de la impresión se introducían componentes para modificar el sabor y la textura. También se aplicó al terreno nutricional para preparar recetas recomendadas por los médicos, así como al ámbito gastronómico, para elaborar creaciones personalizadas, diseñadas por cocineros implicados en el proyecto.

En 2011, David Carr creó, en el MIT Media Lab, un sistema que permitía escanear una cara de una persona y reproducirla luego en un bloque de chocolate mediante una fresadora de control numérico. No era impresión en 3D, pero creó objetos tridimensionales personalizados.

El año 2014 fue clave para la aplicación gastronómica de la impresión en 3D. Empezaron a comercializarse impresoras con aplicaciones específicas para el chocolate, como Choc Creator. Está en desarrollo la Goop Printer, un modelo pensado para personas que deben alimentarse a base de dietas blandas y que, por tanto, utiliza gelificantes o espesantes en la pasta alimentaria para imprimir. También se está trabajando en la 3D Fruit Printer, una impresora basada en la técnica culinaria de la esferificación. Y la Chef Jet, que imprime con azúcar glaseado. Finalmente, Foodini, con sede en Barcelona, se ha propuesto introducir su impresora en todas las casas.

Asimismo, el año pasado se inició un proyecto de colaboración entre la Fundación CIM, de la Universidad Politécnica de Cataluña, experta en impresión en 3D, y el Campus de la Alimentación de Torribera, de la Universidad de Barcelona, que aportará los conocimientos sobre nutrición, tecnología de los alimentos y cocina. El objetivo es mejorar el diseño de las impresoras para uso alimentario y los propios productos.

También las grandes compañías del sector están apostando por la impresión en 3D a escala industrial. La investigación en este campo se centra en la creación de comidas para el consumidor global y, sobre todo, en el diseño de productos personalizados, pensados para enfermos con necesidades dietéticas especiales. Por si fuera poco, la NASA pretende entrar en el mercado con la idea de que los astronautas puedan disfrutar de pizzas y otras elaboraciones impresas en 3D en viajes de larga distancia, que están previstos para un futuro próximo, como la misión tripulada a Marte.

A pesar de todos los adelantos conseguidos hasta ahora, existe todavía una clara brecha entre las expectativas de la sociedad y lo que la técnica actual puede ofrecer. La impresión alimentaria en 3D debe solucionar diversos obstáculos, entre los que destacan el precio de la impresora, la construcción de estructuras que no se desplomen, la cocción, el tiempo de ejecución y, sobre todo, la carga de alimentos. Seguiremos de cerca los próximos avances.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. **ASTRONOMÍA** Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA** Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION** Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA** Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA** Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS** Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA** El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **MEDIOAMBIENTE** Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS** Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. **LUZ Y TÉCNICA** La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. **ENERGÍA** Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 12,00 €

más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

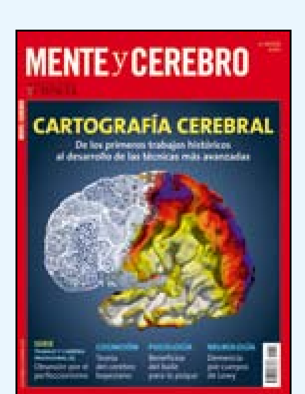
CATÁLOGO DE PRODUCTOS

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe

(*) Disponible solo en formato digital





TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

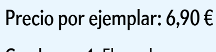
T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal

(*) Disponible solo en formato digital









Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones



BIOLOGÍA CELULAR

VIDA TRAS LA MUERTE CELULAR

En la apoptosis, o muerte programada, las células de nuestro organismo crean una suerte de «ataúd» para evitar que su contenido potencialmente tóxico se libere y cause daños en el tejido circundante

Manuel Oropesa Ávila, Alejandro Fernández Vega y José A. Sánchez Alcázar

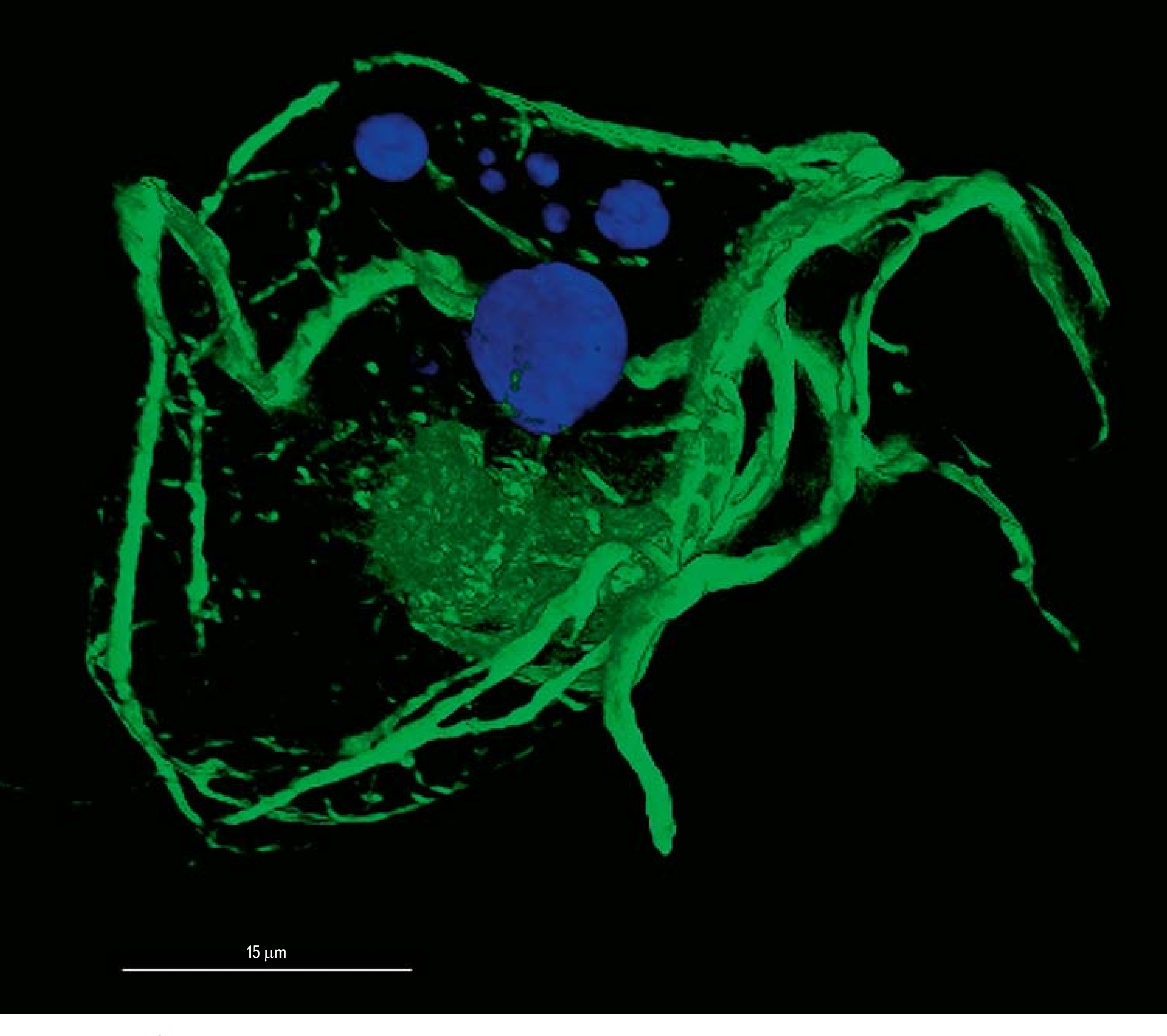
En nuestro cuerpo, así como en el de todos los organismos multicelulares, la muerte de las células ocurre en todo momento, desde las primeras fases del desarrollo embrionario hasta el fallecimiento. Las células se hallan inmersas en un ciclo continuo de proliferación y muerte. El equilibrio entre ambos procesos resulta fundamental para mantener el correcto funcionamiento de los tejidos. Las células que mueren por envejecimiento o por lesiones accidentales son de esta forma remplazadas por otras gracias a la multiplicación de las células vecinas, lo que permite mantener más o menos constante su número en los tejidos y órganos.

El desequilibrio entre ambos mecanismos puede dar lugar a la aparición de diferentes enfermedades. Si la balanza se inclina hacia una mayor proliferación, pueden desarrollarse tumores o procesos cancerosos. En cambio, si se inclina hacia una mayor mortalidad, pueden surgir distintos trastornos neurodegenerativos, como la enfermedad de Alzheimer. Durante el desarrollo embrionario, la eliminación de células desempeña igualmente un papel fundamental, ya que contribuye al modelado final de las estructuras del organismo.

La muerte celular es, pues, un fenómeno inherente a la vida y permite que aquellas células que no funcionan correctamente, ya sea debido a su envejecimiento, a lesiones fortuitas o a la intervención médica (quimioterapia o radioterapia en el tratamiento del cáncer) sean destruidas de una manera controlada. A tal fin, los organismos han desarrollado un mecanismo denominado apoptosis, un tipo de muerte con la que se evita dañar las células vivas vecinas y en la que los macrófagos, unas células especializadas del sistema inmunitario, eliminan las células muertas. La «limpieza» llevada a cabo por los macrófagos permite que la muerte sea fisiológica y no cause mayores problemas al organismo. No obstante, en ocasiones este sistema puede verse saturado, como cuando, a causa de alguna enfermedad, hay un exceso de células muertas por apoptosis y los macrófagos no pueden eliminarlas con la suficiente celeridad.

La muerte celular, en particular la apoptosis, quizá sea uno de los procesos más estudiados en el ámbito de la biología celular. Entender los mecanismos de su funcionamiento en las enfermedades reviste una enorme importancia, ya que no solo puede ayudar a desvelar las causas que las provocan, sino también a plantear nuevas alternativas para su tratamiento.

A nuestro grupo le interesaba averiguar cómo funcionaba uno de los mecanismos clave de la apoptosis, en concreto, cómo se mantenía íntegra la estructura externa de la célula aunque su medio interno estuviera experimentando una degradación que implicaba la destrucción de los orgánulos y otros componentes celulares esenciales. Tal proceso reviste una enorme importancia porque permite a los macrófagos reconocer que una célula se halla en fase de muerte a pesar de su apariencia normal y, por consiguiente, proceden a eliminarla.



ESTA CÉLULA PULMONAR CANCEROSA está experimentando apoptosis. La formación del «ataúd» de microtúbulos (*verde*) y la fragmentación del núcleo (*azul*) son dos rasgos característicos de este tipo de muerte celular.

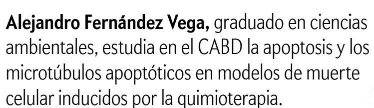
¿CÓMO MUEREN LAS CÉLULAS?

Existen dos tipos fundamentales de muerte celular: la necrosis y la apoptosis. La primera corresponde a la destrucción patológica de un conjunto de células o de cualquier tejido, provocada por un agente nocivo que causa una lesión tan grave que no puede repararse o curarse. Se caracteriza por que la membrana celular se rompe y se liberan los contenidos tóxicos intracelulares, lo que puede provocar daños en el tejido circundante, una deficiente eliminación de las células muertas y la activación de una respuesta inflamatoria. Ejemplos en los que sucede este tipo de muerte corresponden a la zona central de un tejido infartado, o a las lesiones por compuestos tóxicos, quemaduras o acciones mecánicas que dañan directamente las membranas celulares. Por el contrario, la apoptosis corresponde a una muerte fisiológica en la que la membrana permanece íntegra, lo que permite la correcta eliminación de la célula por los macrófagos sin ocasionar daños en las vecinas. Es la que tiene lugar en las neuronas en la enfermedad de Alzheimer o en las células senescentes que presentan daños en el ADN.

El término apoptosis deriva del griego *apó* y *ptōsis*, que significa *separar* y *caer*, en referencia a la caída de las hojas de los árboles en otoño. Fue acuñado en 1972 por John F. R. Kerr, de la Universidad de Queensland, y sus colaboradores para describir un modo de muerte que observaron en distintos tejidos y tipos celulares, al darse cuenta de que presentaban unas características morfológicas distintas de las células necróticas. También denominada «muerte celular programada», en ella las células activan de forma controlada su propia muerte tras recibir ciertos estímulos. La apoptosis tiene como función biológica principal mantener la estabilidad de las células en los tejidos (homeostasis).

Al ser un proceso altamente selectivo, ejerce una función esencial tanto en condiciones normales como patológicas. En

Manuel Oropesa Ávila, doctor en biotecnología y tecnología química, investiga en el Centro Andaluz de Biología del Desarrollo (CABD), del CSIC, la red de microtúbulos apoptóticos y los factores que influyen en su formación.



Alejandro Fernández Vega, graduado en ciencias ambientales, estudia en el CABD la apoptosis y los microtúbulos apoptóticos en modelos de muerte celular inducidos por la quimioterapia.



José A. Sánchez Alcázar, especialista en bioquímica clínica, es investigador en el CABD y profesor de biología celular en la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla. Sus trabajos se centran en la apoptosis y en la fisiopatología y tratamiento de las enfermedades mitocondriales y de otras enfermedades raras.



el primer caso, contribuye a dar forma a los tejidos y órganos durante el desarrollo embrionario, como sucede durante la formación de los dedos; participa en la involución fisiológica que tiene lugar durante la regresión de la mama tras la lactancia; interviene en la destrucción normal de las células en el tracto digestivo, que viene acompañada por una nueva proliferación; o permite la involución del timo a edades tempranas del desarrollo. Entre las situaciones patológicas, cabe mencionar la muerte celular inducida por la quimioterapia o la radioterapia en el tratamiento del cáncer, la destrucción de los linfocitos durante la infección por el virus del sida o la muerte inducida por agentes infecciosos, como las hepatitis víricas.

Durante la apoptosis, las células activan un programa de muerte, altamente regulado, que se halla codificado en el genoma nuclear. Cuando una célula recibe ciertos estímulos que le hacen tomar la decisión de morir, pone en marcha una serie de procesos que dan lugar a la activación de unas proteínas especiales, las caspasas, las cuales se encargan, directa o indirectamente, de degradar las moléculas y estructuras intracelulares. Si bien en la célula apoptótica la membrana se halla íntegra, su medio interno está siendo destruido por estas proteínas.

Otra característica de la célula apoptótica es que en su membrana celular se externalizan moléculas de fosfatidilserina, un tipo de fosfolípidos que normalmente se localizan en la cara interna de la membrana (la cara citosólica). Cuando se sitúa en la parte externa, el macrófago identifica que la célula está muerta y procede a su eliminación mediante un proceso denominado fagocitosis (literalmente, engulle a la célula).

CAMBIOS MORFOLÓGICOS Y BIOQUÍMICOS

Las alteraciones morfológicas que se producen en la célula durante la apoptosis afectan tanto al núcleo como al citoplasma y son muy similares en todos los tipos celulares y especies multicelulares. Por lo general, se requieren solo algunas horas desde que el proceso se inicia hasta que las células son finalmente engullidas por los macrófagos. Sin embargo, la duración total depende del tipo celular afectado, del estímulo que desencadena la muerte y de la vía bioquímica concreta que la dirige.

Los cambios morfológicos en el núcleo consisten en la condensación de la cromatina y la fragmentación nuclear. Estos vienen acompañados de un redondeamiento de la célula, una reducción de su volumen y una retracción de sus prolongaciones.

Por otro lado, en la membrana plasmática, que se mantiene intacta, se forman una suerte de burbujas o ampollas (fenómeno conocido como *blebbing*) y, además, se producen modificaciones estructurales de los orgánulos citoplasmáticos. En última instancia, la membrana se desintegra, aunque, antes de ello, la célula es engullida por un macrófago. Si las células apoptóticas no son fagocitadas, como sucede en los cultivos celulares en el laboratorio, sufrirán un proceso de degradación parecido a la necrosis denominado necrosis secundaria.

Las alteraciones morfológicas descritas tienen lugar a la vez que se suceden una serie de cambios bioquímicos, principalmente, la activación de las caspasas, la fragmentación del ADN y otras proteínas y modificaciones en la membrana que permiten el reconocimiento por parte de las células fagocíticas.

Las caspasas son un grupo de enzimas que pertenecen a la familia de las cisteína-proteasas, cuya función consiste en degradar otras proteínas. La *c* de *caspasa* hace referencia a la cisteína, en tanto que *aspasa* alude a la propiedad única de la enzima de cortar siempre las moléculas en un punto situado donde se halla el aminoácido aspártico. Las caspasas activadas cortan muchas proteínas celulares vitales y rompen el andamiaje nuclear y el citoesqueleto (la red de proteínas que ofrece sostén a la célula).

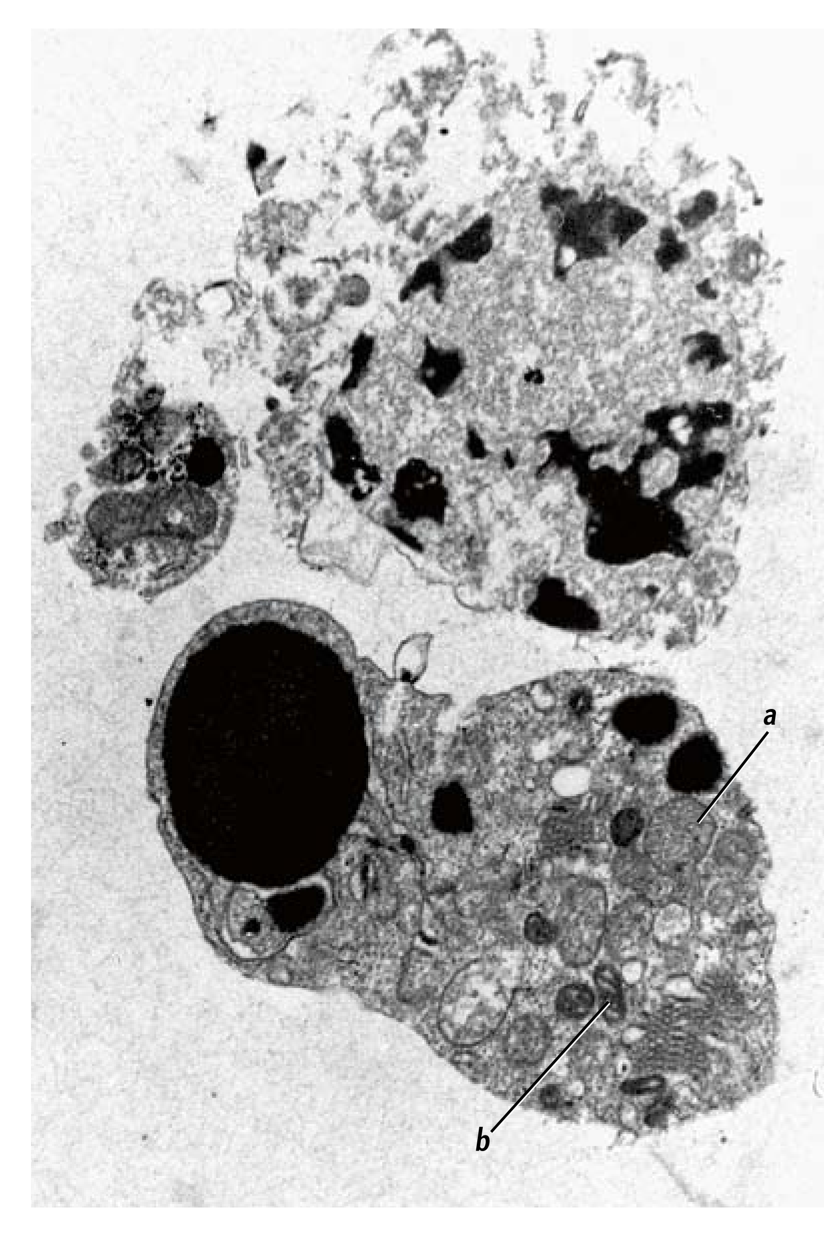
EN SÍNTESIS

En nuestro cuerpo, la muerte de las células ocurre sin cesar, al tiempo que se renuevan los tejidos y los órganos. El mecanismo para eliminar las células senescentes o defectuosas sin ocasionar daños al tejido circundante se denomina apoptosis, un tipo de muerte celular que se produce de forma programada.

Durante este proceso, se desencadena una cascada de reacciones proteolíticas que degradan los componentes celulares. Pero estas no alcanzan a la membrana, que se mantiene íntegra gracias a la formación de una barrera de microtúbulos que facilitan la eliminación controlada de la célula.

Conocer en profundidad el mecanismo de la apoptosis puede ayudar a determinar el origen del desequilibrio entre muerte y renovación celular que se asocia con ciertas enfermedades, como el alzhéimer.

DOS TIPOS DE MUERTE CELULAR: **necrosis y apoptosis. En esta imagen obtenida mediante microscopía electrónica de trasmisión se observan los cambios morfológicos que experimenta una célula necrótica (*arriba*) y otra apoptótica (*abajo*). En la primera se aprecia una desintegración de la membrana plasmática y una liberación del contenido celular. En la segunda, la membrana permanece íntegra y el contenido se halla confinado, aunque este ha empezado a degradarse: se observa el núcleo fragmentado (*manchas negras*) y mitocondrias hinchadas (*a*) o condensadas (*b*).**



También activan a las ADNasas, otras enzimas que fragmentan el núcleo y degradan el ADN nuclear en fragmentos de unos 200 pares de bases o sus múltiplos.

PRINCIPALES VÍAS DE LA APOPTOSIS

Entender los mecanismos de la apoptosis y conocer en profundidad los factores que la desencadenan resulta crucial porque ayuda a entender las causas de algunas enfermedades, como el cáncer o el alzhéimer. Tal conocimiento puede contribuir al desarrollo de fármacos que repriman ciertos genes responsables de la apoptosis o alguna de las vías que llevan a ella.

Como hemos comentado, las caspasas desempeñan un papel esencial en el proceso, ya que son tanto iniciadoras como ejecutoras de la muerte celular. Existen tres vías por las que estas enzimas pueden ser activadas. Las dos de iniciación son la vía extrínseca (o del receptor de muerte) y la vía intrínseca (o mitocondrial). Ambas desembocan finalmente en una vía común, o fase de ejecución de la apoptosis. Una tercera vía de iniciación, menos conocida, es la vía intrínseca del retículo endoplasmático.

La vía extrínseca del receptor de muerte comienza cuando ciertas proteínas liberadas al medio extracelular por otras células (por ejemplo, el factor de necrosis tumoral producido por células del sistema inmunitario) se unen a un receptor de muerte en la membrana plasmática. Como resultado de esta unión, los receptores atraen a otras moléculas, las proteínas adaptadoras, con las que forman un complejo responsable de la activación de ciertas caspasas. Entre ellas se halla la caspasa 8, que corta a otras enzimas y da lugar a moléculas más pequeñas y activas, como la caspasa 3, que participa en la fase de ejecución.

Como su nombre indica, la vía intrínseca se inicia debido a estímulos de muerte que se producen dentro de la célula, y en ella participan las mitocondrias (el orgánulo encargado de producir energía para la actividad celular). Un daño genético irreparable, la hipoxia, concentraciones extremadamente altas de calcio y un estrés oxidativo intenso son posibles activadores de la vía mitocondrial intrínseca. Con independencia del estímulo, esta vía se pone en marcha cuando la mitocondria libera moléculas proapoptóticas, como el citocromo c, hacia el citoplasma. Tal liberación activa la caspasa 3 por medio de la formación de un complejo molecular conocido como apoptosoma, constituido por el citocromo c, Apaf-1 (una proteína citosólica) y la caspasa 9.

Existe una tercera vía intrínseca poco conocida en la que interviene el retículo endoplasmático (un orgánulo que participa en la síntesis proteica y el metabolismo de los lípidos, así como en el transporte intracelular) y mediante la que se cree que se activa la caspasa 12. Cuando el retículo endoplasmático es lesionado a causa de algún factor de estrés celular, como hipoxia, radicales libres o falta prolongada de glucosa, hay un plegamiento incorrecto de las proteínas y una menor síntesis de estas en la célula. En tales condiciones, se produce la activación de la caspasa 12, la cual pondría en marcha a su vez la vía común que converge en la caspasa 3.

En última instancia, las caspasas formadas en la fase previa de iniciación (la 9 en la vía mitocondrial, la 12 en la del retículo endoplasmático y la 8 en la extrínseca) coinciden en la fase común o de ejecución de la apoptosis al activar la caspasa 3 y otras caspasas efectoras. La caspasa 3, una vez movilizada, destruye el inhibidor de la desoxirribonucleasa, una enzima responsable de la degradación del ADN, por lo que esta última puede ejercer su acción y romper el ADN. Además, las caspasas efectoras inducen la descomposición de otra serie de proteínas: las que dirigen la señalización y el desarrollo del ciclo celular, las del citoesqueleto, las de reparación del ADN y las subunidades inhibidoras de las endonucleasas (con lo que estas pueden ejercer su función de cortar los ácidos nucleicos). La degradación de todas estas moléculas contribuye a los cambios morfológicos y bioquímicos típicos de la apoptosis.

El hecho de que los precursores de las caspasas estén expresados continuamente en las células vivas y de que la

apoptosis pueda inducirse con rapidez en ellas demuestra la elevada complejidad y eficiencia del proceso de regulación de las caspasas.

REORGANIZACIÓN DEL CITOESQUELETO

La apoptosis y la activación de las caspasas, con independencia de la vía activada, se acompañan de profundas reorganizaciones del citoesqueleto, un entramado de proteínas que mantiene la estructura y da forma a la célula. El citoesqueleto consta de tres elementos principales: los filamentos de actina (polímeros de actina), los filamentos intermedios (polímeros de diversas proteínas) y los microtúbulos (polímeros de tubulina). Los tres elementos forman una intrincada red tridimensional que, además de dar sostén a la célula, regulan el tráfico intracelular de vesículas, así como la división y el movimiento celular, entre otros fenómenos.

Cuando la célula entra en apoptosis y las caspasas se activan, en un primer momento se contraen los filamentos de actina; más tarde estos se despolimerizan junto con los filamentos intermedios y los micrótubulos. Como resultado, la célula se queda sin elementos de sostén y con la membrana plasmática desprotegida ante la acción de las caspasas. En tal situación, las células organizan, por mecanismos aún desconocidos, una red de microtúbulos que se colocan debajo de la membrana plasmática. Su función principal consiste en dar soporte a la célula y formar una barrera que evite que las caspasas alcancen la membrana plasmática. Esa nueva estructura se denomina red de microtúbulos apoptóticos o «ataúd» celular, ya que tiene como objeto confinar los procesos de degradación dentro de la célula muerta y evitar que se liberen compuestos tóxicos al exterior, con lo que no se desencadenan las respuestas inflamatoria e inmunitaria propia de la necrosis.

La red de microtúbulos representa una de las líneas centrales de investigación de nuestro laboratorio. Mediante la desorganización y destrucción de esta red y la observación de las consecuencias de tal manipulación, nuestro equipo ha logrado demostrar el papel esencial de esta estructura en la apoptosis. A tal fin, expusimos células apoptóticas a la colchicina, una sustancia que despolimeriza los microtúbulos. Como consecuencia de tal exposición, identificamos, en primer lugar, un colapso de las células, lo que indica que la barrera de microtúbulos cumple una función fundamental en dar sostén a la célula apoptótica. En segundo lugar, descubrimos que la colchicina aumentaba la permeabilidad de la membrana plasmática y daba lugar a

BIOQUÍMICA

Las rutas de la apoptosis

Ciertos estímulos, como la existencia de daños en el ADN o determinadas proteínas liberadas por otras células, indican a una célula que debe iniciar su propia destrucción, o apoptosis. En función del estímulo recibido, se activa en la célula una u otra ruta bioquímica (una serie de reacciones en cadena). Se han descrito tres vías iniciadoras principales: una extrínseca (*flechas verdes*), que responde a estímulos externos, y dos intrínsecas (*flechas azules y rojas*), que lo hacen a estímulos internos. Las tres desembocan en una vía común, que pone en marcha el programa de la apoptosis. En todas las vías intervienen distintos tipos de caspasas, unas enzimas que degradan componentes celulares esenciales.

EXTERIOR CELULAR

Vía extrínseca
El ligando de muerte (una proteína producida por otras células que actúa a modo de estímulo) se une a otra proteína que se halla en la membrana plasmática, el receptor de muerte. Ello provoca la activación de la caspasa 8, que, a su vez, activa la caspasa 3.

Ligando de muerte

MEMBRANA PLASMÁTICA

Receptor de muerte

Caspasa 8

Vía intrínseca mitocondrial
Las mitocondrias liberan proteínas proapoptogénicas, como el citocromo c, que activan la caspasa 9, la cual pone en marcha la caspasa 3.

Citocromo c

Mitocondria

Caspasa 9

Vía intrínseca del retículo endoplasmático
Un factor de estrés, como la acumulación de proteínas mal plegadas en este orgánulo, produce la activación de la caspasa 12 y, a su vez, de la caspasa 3.

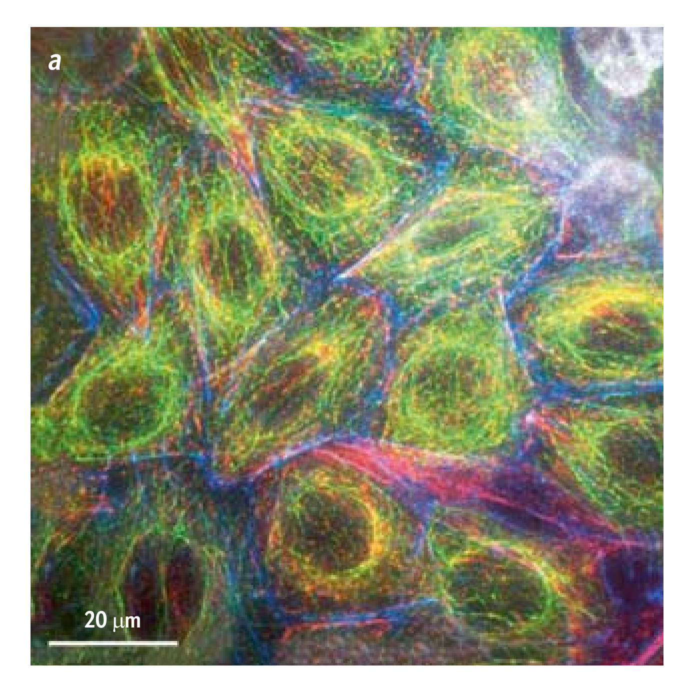
Caspasa 3

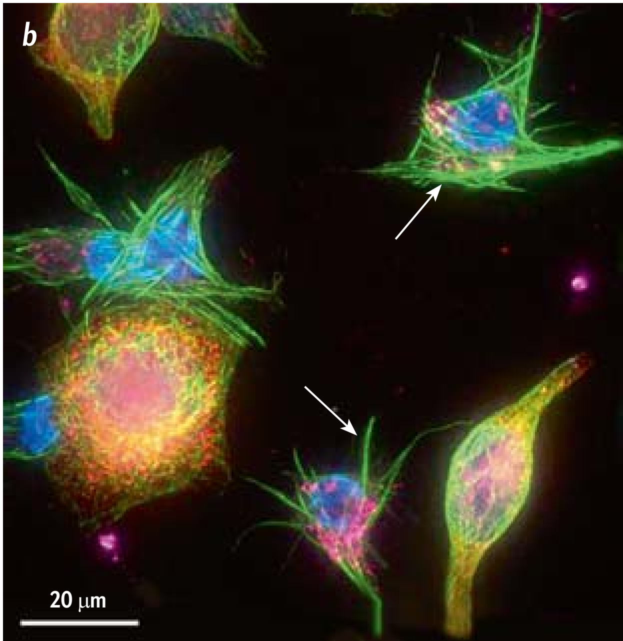
Caspasa 12

APOPTOSIS

Retículo edoplasmático

INTERIOR CELULAR





LOS PRINCIPALES ELEMENTOS del citoesqueleto, los filamentos de actina (*azul*), los filamentos intermedios (*rosa*) y los microtúbulos (*verde*), forman una intrincada trama dentro de las células vivas (*a*). En las células apoptóticas (*b*), el citoesqueleto se reorganiza y se crea una red o ataúd de microtúbulos (*flechas*). Ambas imágenes corresponden a células cancerosas de pulmón.

la liberación de contenidos intracelulares al medio externo, lo que pone de manifiesto que esta red, o «ataúd», contribuye a mantener íntegra la membrana.

Además, hemos demostrado que los microtúbulos apoptóticos son una estructura compleja y necesitan del aporte de energía en forma de adenosín trifosfato (ATP) por parte de las mitocondrias. Lo hemos comprobado porque, cuando interferimos en la producción de esta molécula, los microtúbulos apoptóticos se despolimerizan y la membrana plasmática pierde su impermeabilidad y se liberan los contenidos intracelulares. Ello refuerza la idea sobre el papel activo que ejerce la célula en su propia muerte.

Al profundizar en la función de la red de microtúbulos, hemos observado que estos actúan como una barrera física que impide que las caspasas accedan a la membrana plasmática y degraden ciertas proteínas insertadas en ella encargadas de mantener el equilibrio iónico y la impermeabilidad de la membrana. Como consecuencia de la existencia de esta barrera se forma una zona entre esta y la membrana denominada corteza celular, la cual se halla libre de la acción degradativa de las caspasas. A causa de tal ausencia, se produce la correcta externalización de la fosfatidilserina y ello permite la identificación de la célula apoptótica por los macrófagos, que proceden a eliminarla. Además, sin la acción de las caspasas, los canales y bombas iónicas de la membrana (las de calcio y las de sodio/potasio) pueden funcionar con normalidad, con lo que se evita el desequilibrio iónico y la consiguiente entrada de líquidos e hinchamiento de la célula, como sucede en la necrosis.

De este modo se logra que el interior de la célula se halle inmerso en un proceso de degradación y destrucción mientras la zona de la corteza celular, delimitada por los microtúbulos apoptóticos, permanece «viva». Es lo que denominamos «vida tras la muerte celular» para ilustrar que en la apoptosis no toda la célula está realmente muerta.

En la corteza se refugian otras proteínas esenciales para el funcionamiento normal de la célula. Cabe destacar la espectrina, que da soporte a la membrana, así como las cinasas de adhesión focal (FAK) y otras moléculas que participan en la adhesión de las células al sustrato donde se ubican en los tejidos. Hemos observado que todas esas proteínas, al igual que otras ya mencionadas, se encuentran, asimismo, inalteradas durante la apoptosis; sin embargo, si se provoca la desorganización de la red de microtúbulos apoptóticos, estas son degradadas y la célula entra en un proceso de necrosis.

Otros grupos, como el de Jon Lane, de la Universidad de Brístol, están investigando también el papel de esta estructura en la apoptosis, en particular, su participación en el movimiento intracelular de los fragmentos nucleares.

IMPLICACIONES PARA LA SALUD

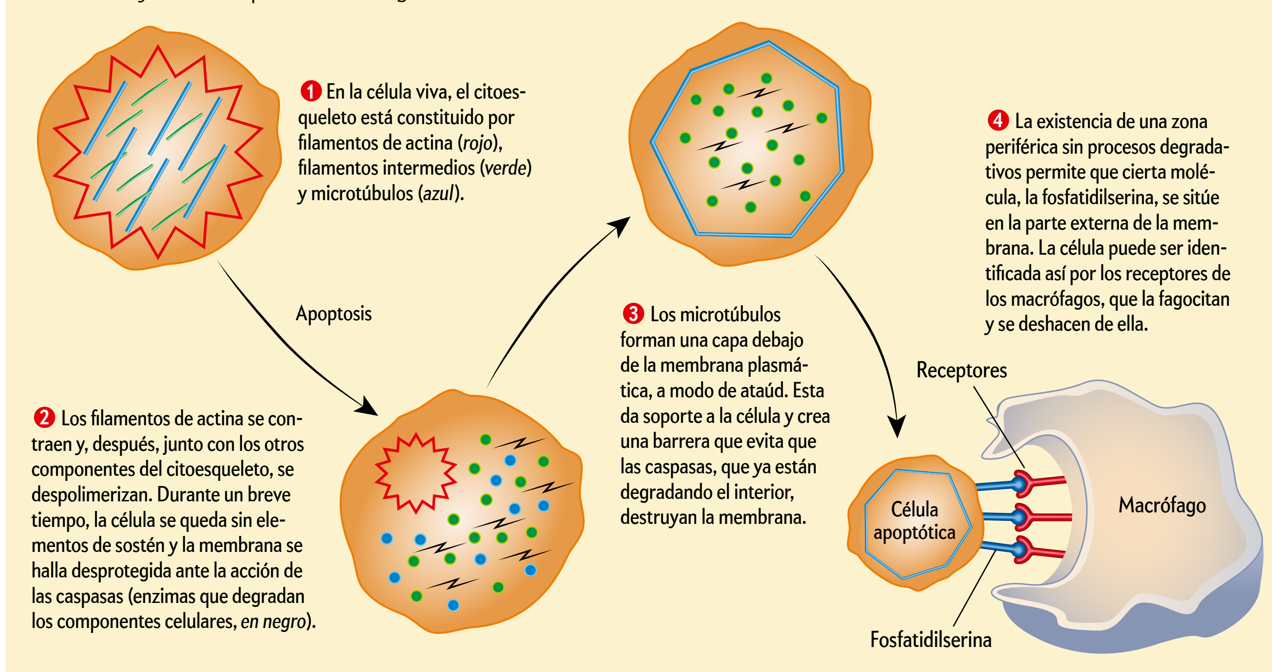
Nuestro trabajo ha demostrado el papel fundamental de los microtútbulos para mantener la integridad de las células durante la apoptosis. Los hallazgos sobre la formación del ataúd celular pueden tener una gran repercusión en la práctica médica. En ocasiones, ciertas acciones terapéuticas tienen como finalidad provocar la muerte de las células cancerosas, como la quimioterapia o la radioterapia. Sin embargo, las consecuencias del tratamiento dependerán de su intensidad y agresividad. Si estas son adecuadas, se desencadenará la apoptosis, con la muerte fisiológica de las células tumorales, que serán eliminadas por los macrófagos; pero un tratamiento muy agresivo impedirá la correcta formación de los microtúbulos apoptóticos y originará la necrosis, con una liberación del contenido intracelular que provocará daños a las células vecinas e inflamación. De ahí que sería de gran interés conocer el modo en que los diferentes tratamientos anticancerosos afectan a la formación de los microtúbulos apoptóticos.

De hecho, hace poco hemos descubierto un modo de conservar temporalmente la integridad de la estructura de microtúbu-

CAMBIOS ESTRUCTURALES

La célula crea su propio «ataúd»

Una de las estructuras fundamentales que se forman en la célula durante la apoptosis, según ha descubierto nuestro grupo, es una capa de microtúbulos, o «ataúd» celular, que se sitúa por debajo de la membrana plasmática. Como consecuencia de la activación de las enzimas caspasas (*véase el recuadro* «Las rutas de la apoptosis»), el citoesqueleto, una red de filamentos que dan sostén a la célula e intervienen en el transporte de sustancias, se reorganiza y crea una barrera en la periferia. Ello permite que la célula sea reconocida y eliminada por los macrófagos.



los apoptóticos; en concreto, hemos empleado una mezcla de compuestos entre los que figura el paclitaxel (un antineoplásico cuyo nombre comercial es Taxol®). La estrategia permite prolongar el tiempo de la apoptosis y genera células «zombis», que mantienen ciertas características vitales a pesar haber iniciado el proceso de muerte. Con ello se evitan los fenómenos tóxicos y proinflamatorios inducidos por la necrosis secundaria derivada de los tratamientos contra el cáncer. Tal invención, que ha sido patentada, la detallamos en un artículo publicado el pasado agosto en la revista *Cell Death Disease*.

La estabilización de las células apoptóticas puede ofrecer otras posibilidades novedosas en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Por un lado, al ampliar el tiempo de la apoptosis, permitirá realizar una medida más fiable y exacta del número de células apoptóticas, una determinación que a menudo reviste dificultad porque, durante la manipulación en el laboratorio, muchas células entran en necrosis secundaria, lo que da lugar a cuantificaciones inexactas. La introducción de la técnica en kits diagnósticos ayudaría a evaluar los efectos citotóxicos de diferentes compuestos o a detectar la muerte neuronal en modelos de la enfermedad de Alzhéimer. Por otro lado, las células apoptóticas estabilizadas pueden ser utilizadas como vehículos para hacer llegar sustancias terapéuticas a los macrófagos. De este modo, podrían emplearse para administrar antiinflamatorios a los macrófagos en las enfermedades que cursen con inflamación crónica.

Sin embargo, todavía quedan numerosos aspectos básicos y biotecnológicos de la apoptosis que deben ser estudiados en profundidad. Estos conocimientos, sin duda, ayudarán a perfeccionar el método para estabilizar las células apoptóticas y lograr que perduren durante más tiempo. Ello representaría un avance fundamental para dirigir con certeza los compuestos terapéuticos contra los macrófagos y luchar con mayor eficacia contra las enfermedades.

PARA SABER MÁS

Apoptosis: A basic biological phenomenon with wide-ranging implications in tissue kinetics. J. F. Kerr, A. H. Wyllie y A. R. Currie en *British Journal of Cancer*, vol. 26, n.º 4, págs. 239-257, 1972.

The apoptotic microtubule network preserves plasma membrane integrity during the execution phase of apoptosis. J. A. Sánchez Alcázar et al. en *Apoptosis*, vol. 12, n.º 7, págs. 1195-1208, 2007.

Apoptotic microtubule network organization and maintenance depend on high cellular ATP levels and energized mitochondria. M. Oropesa et al. en *Apoptosis*, vol. 16, n.º 4, págs. 404-424, 2011.

Apoptotic microtubules delimit an active caspase free area in the cellular cortex during the execution phase of apoptosis. M. Oropesa Ávila et al. en *Cell Death and Disease*, vol. 4, pág. e527, 2013.

Stabilization of apoptotic cells: generation of zombie cells. M. Oropesa Ávila et al. en *Cell Death and Disease*, vol. 14, pág. e1369, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Suicidio celular, en la salud y en la enfermedad. Richard C. Duke, David M. Ojcius y John Ding-E Young en *IyC*, febrero de 1997.

Suicidio celular. Jean Claude Ameisen en *Biología del envejecimiento*, colección *Temas* de *IyC* n.º 11, 1998.

SALUD

EL ÁRTICO ENFERMA

El calentamiento del polo está debilitando a sus moradores, desde el buey almizclero hasta los cada vez más numerosos pobladores humanos

Christopher Solomon



ICO



ESTE IMPONENTE REBAÑO de bueyes almizcleros se agrupa para hacer frente a una ventisca de nieve, pero sus miembros están totalmente indefensos contra un parásito pulmonar que amenaza su salud.



Christopher Solomon escribe con asiduidad sobre medioambiente y actividades al aire libre para el *New York Times* y la revista *Outside*, entre otras publicaciones.

Las nutrias marinas que retozan en las aguas de las islas Aleutianas deberían prosperar en su remoto hogar, lejos de la civilización.

Pero estos juguetones animales atraviesan dificultades. En menos de una década la población de estas islas y del sudoeste de Alaska ha sufrido un alarmante descenso del 70 por ciento.

Con el fin de descifrar las causas del declive, el equipo de investigación de Tracey Goldstein, de la Universidad de California en Davis, emprendió la búsqueda de enfermedades. Y lo que descubrieron resultó inquietante: indicios del virus del moquillo focino. En los últimos veinte años, el patógeno ha matado a más de 50.000 focas en las costas europeas y parece haber ocasionado la muerte de otras en la costa oriental de Canadá y EE.UU. Pero nunca se había hallado en el Pacífico norte: ¿cómo ha ido a parar allí?

Las pesquisas señalaron pronto hacia el hielo del Ártico o, mejor dicho, a la ausencia de este. En 2002, cuando la última gran epidemia de moquillo azotó el norte de Europa, la banquisa que en verano cubre el Ártico alcanzó una extensión ínfima. Goldstein supuso que la fusión del casquete había abierto el legendario Paso del Noroeste a las enfermedades e hizo posible que un mamífero marino infectado en el Atlántico, como una foca ocelada, o sus heces, entrase en contacto con mamíferos marinos del Pacífico norte y transmitiera el virus a las nutrias. El fragmento del virus hallado en las nutrias de las Aleutianas es idéntico al del brote de 2002 en Europa.

No todos aceptan esta teoría; pero, de ser cierta, los mamíferos del Ártico y del Pacífico, en particular las focas comunes, podrían ser las próximas víctimas del virus. Goldstein, responsable del Laboratorio de Vigilancia y Diagnóstico Sanitario de los Ecosistemas Marinos de la universidad, está convencida. Más aún, en el Paso del Noroeste están confluyendo otras especies (o sus deyecciones), lo que posiblemente provocará el contagio de nuevas enfermedades. En verano de 2010 tuvo lugar un encuentro entre ballenas boreales del Atlántico y del Pacífico —marcadas y seguidas por satélite—, un hecho que quizá no se había producido desde el inicio del Holoceno, hace 12.000 años.

El calentamiento global está afectando con más celeridad a los polos que casi a cualquier otra región del planeta; y la fauna terrestre y marina está enfermando. La temperatura media de Alaska ha aumentado 1,9 grados Celsius en el último medio siglo, en comparación con los 0,7 del conjunto del planeta. El termómetro invernal en Alaska está ascendiendo incluso con más rapidez que en verano, con un incremento medio de 2,6 grados Celsius. El calentamiento creará condiciones más propicias para los patógenos y los parásitos y fomentará la migración hacia el norte de numerosos animales y plagas que, como las garrapatas, son portadoras de enfermedades. Nuevas especies se encaminan por tierra y por mar hacia el norte más cálido, llevando consigo microbios desconocidos en tales latitudes.

La migración también podría causar problemas a los humanos. En un mundo cada vez más pequeño donde algunas de las antiguas barreras están desapareciendo, la transmisión de patógenos de los animales a los humanos resulta cada vez más frecuente. Más del 60 por ciento de las nuevas enfermedades infecciosas surgidas desde 1940 tienen como vehículo de contagio a los animales; entre ellos, los virus del Ébola y del síndrome respiratorio agudo grave (SARS, por sus siglas en inglés). Según Michael Grigg, jefe de parasitología molecular en el Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas de EE.UU., «si los animales enferman, nosotros también acabaremos haciéndolo».

Tales cambios podrían alterar, asimismo, las poblaciones de animales y poner en peligro los ecosistemas y las fuentes de alimento de los pueblos indígenas. No está muy claro si el mayor número de enfermedades que estamos presenciando es solo fruto del escrutinio de los científicos y nadie se atreve a vaticinar que la vida en los polos pueda desmoronarse a causa del contagio. Pero Claire Heffernan, especialista en salud global de la Universidad de Oxford, advierte que la nueva situación está convirtiendo el Ártico «en la caja de Pandora de las enfermedades infecciosas y del cambio climático».

Parásitos que maduran más rápido

Un modo en que el calentamiento del clima fomenta la propagación de las enfermedades en las altas latitudes es acelerando la maduración de los parásitos. Un ejemplo ilustrativo lo ofrece *Umingmakstrongylus pallikuukensis*, un nemátodo pulmonar

EN SÍNTESIS

El calentamiento del Ártico está facilitando la propagación de patógenos en lugares donde se desconocían.

Los parásitos amenazan la salud del buey almizclero, las garrapatas están transmitiendo virus a los colonos humanos, y las focas del Atlántico habrían contagiado un virus mortífero a sus congéneres del Pacífico porque la fusión del hielo ha permitido que ambas entraran en contacto.

El cambio climático podría beneficiar a algunas especies, pero se teme que el número de perjudicadas sea mayor, lo que plantea la urgencia de orquestar estrategias internacionales que refuercen la bioseguridad.

PÁGINAS ANTERIORES: NORBERT ROSING, *NATIONAL GEOGRAPHIC* (*bueyes almizcleros*); CORTESÍA DE PRATAP KAFLE, UNIVERSIDAD DE CALGARY (*parásito*)

ESTUDIO DE CASOS

Los patógenos migran al norte

Los investigadores están descubriendo enfermedades foráneas en lugares inusitados del círculo polar. Las garrapatas y otros vectores de patógenos de las regiones templadas viajan a lomos de la fauna que migra hacia el norte, siguiendo el avance de los bosques. Los mosquitos están propagando dolencias hacia latitudes cada vez más altas. Las focas del Atlántico y del Pacífico están intercambiando enfermedades. Algunos de esos descubrimientos se destacan a continuación.

Suecia
Los mosquitos han transmitido la bacteria de la tularemia a personas de todo el país.

Región de Arcángel, Rusia
Los casos de encefalitis transmitida por garrapatas se han multiplicado por cincuenta entre las décadas de 1980-1989 y 2000-2009.

Islas Aleutianas, Alaska
El virus del moquillo que infecta a las focas del Atlántico norte se ceba con las nutrias marinas del norte del Pacífico.

Isla de San Lorenzo, mar de Bering
A 200 kilómetros de la costa de Alaska, el cólera aviar ha acabado en esta isla con cientos de fulmares, araos y mérgulos empenachados, una aves marinas en las que nunca se había descrito la enfermedad.

Sahtu, Territorios del Noroeste
Se han descubierto garrapatas en pieles de alce cazados en lugares donde hasta ahora no se habían observado estos parásitos.

Isla Victoria, archipiélago ártico canadiense
Un nemátodo pulmonar ha avanzado cientos de kilómetros desde el sur y afecta a la población autóctona de buey almizclero.

Isla de Hay, Nueva Escocia
Las focas oceladas han contagiado a las focas grises un parásito que en 2012 causó la muerte de 400 crías.

XNR PRODUCTIONS

que parasita el buey almizclero, esa reliquia de las glaciaciones lanuda y maloliente que habita en los Territorios del Noroeste en Canadá. El gusano mantiene una relación fascinante con su hospedador: las hembras, de hasta 65 centímetros de largo, depositan los huevos en grandes quistes alojados en los pulmones del buey. Tras la eclosión de los huevos, las larvas son expectoradas por el buey, que las engulle y acaban yendo a parar a las heces. Los caracoles y las babosas recogen con sus pies las larvas dispersadas de ese modo, que terminan por hallar un nuevo anfitrión cuando otros bueyes ingieren por accidente los gasterópodos. Las bajas temperaturas estivales del Ártico mantienen el gusano bajo control. Casi nunca hace el suficiente calor para que las larvas alcancen el estado infeccioso en el cuerpo del molusco, por lo que pasan el invierno en estado inmaduro y no concluyen el desarrollo hasta el verano siguiente.

Pero según Susan Kutz, profesora del departamento de salud pública y ecosistemas de la Universidad de Calgary, se ha llegado a un punto de inflexión. La bonanza dura más y permite que el parásito madure en un solo verano en lugar de dos. Ahora resulta mucho más probable que infecten a los bueyes y completen el ciclo vital en ese plazo de tiempo, lo que a su vez mejora la supervivencia y acelera la propagación.

Revitalizado, el nemátodo avanza. En 2008, Kutz y otros expertos comprobaron que había recorrido cientos de kilómetros en dirección norte, hasta la isla Victoria del archipiélago ártico de Canadá, hogar del 30 por ciento de la población mundial de buey almizclero. Hoy infecta a todos los bóvidos que frecuentan los lugares colonizados por él.

La incursión del parásito supone un doble contratiempo. En condiciones normales no causaría excesivos problemas. El buey «presentaría tos de fumador o algo parecido», explica Kutz. Pero la calidez estival también está afectando a las manadas. «Conviene tener en cuenta que, para el buey almizclero, el calor es sinónimo de mal tiempo». El estrés generado por las mayores temperaturas y los problemas pulmonares derivados de la presencia masiva de quistes lo debilitan y predisponen a sufrir otras infecciones. Y según Kutz, «En ciertas circunstancias, ello puede determinar si un animal vivirá o morirá».

Es indudable que la población mengua a pasos agigantados. Los pobladores autóctonos también están preocupados porque los bueyes constituyen una fuente de alimento y de otros materiales naturales.

LAS GARRAPATAS Y LOS MOSQUITOS SE EXTIENDEN

El alza de las temperaturas ha favorecido el desplazamiento hacia el norte de algunas plantas y animales que llevan consigo nuevas enfermedades. Por ejemplo, los bosques de Rusia están invadiendo la tundra al ritmo de un kilómetro al año. El ratón de campo, la liebre, el erizo, el jabalí, el alce y hasta una docena de aves están colonizando la taiga en expansión.

Y las garrapatas viajan a lomos de los nuevos ocupantes. Cuando llega el otoño, estos parásitos se preparan para soportar el gélido invierno internándose en la piel de animales como el alce. En 2013, la investigadora Cyntia Kayo Kashivakura descubrió garrapatas en cinco pieles de alce de una muestra de 30 trofeos cazados en Sahtu, la región aborigen situada en el norte de los Territorios del Noroeste canadienses; era la primera vez que se observaban en ese lugar.



LAS GARRAPATAS INVERNALES, que sobreviven al gélido frío guarecidas en el pelaje de los alces, están desplazándose hacia el norte, donde debilitan a los animales de esas latitudes.

DON JOHNSTON, CORBIS (*moose*); CORTESÍA DE RON MOEN, UNIVERSIDAD DE MINNESOTA, DULUTH (*ticks*)

Las garrapatas y otras amenazas no son el único problema de origen animal que afecta al Ártico. Los cerca de cuatro millones de personas que viven en las altas latitudes boreales también corren peligro. Cerca del 10 por ciento habita en pequeñas localidades, pero muchas residen en ciudades en auge, de hasta 300.000 habitantes, como la localidad rusa de Murmansk. La búsqueda de yacimientos de hidrocarburos y el turismo continúan atrayendo a más colonos. En Suecia los efectos ya se han hecho notar. El país sufrió en 2011 una cifra récord de casos de encefalitis vírica transmitida por garrapatas (inflamación del cerebro), que volvió a repetirse en 2012. El aumento de la temperatura y la mayor duración de la estación de crecimiento han permitido que el corzo, el principal hospedador de las hembras de garrapata, extienda sus dominios hacia el norte. Los análisis indican que el virus que transporta puede multiplicarse en las glándulas salivales de la garrapata durante la estación templada, por lo que está listo para infectar a una nueva víctima a través de la picadura.

Los mosquitos también se están extendiendo por toda Suecia y diseminan a su paso *Francisella tularensis*, una bacteria infecciosa que es la principal responsable de la tularemia. La enfermedad se caracteriza por un cuadro de fiebre alta e inflamación aguda que desemboca en la muerte. Resulta tan mortífera que, en los años cincuenta del pasado siglo, norteamericanos y rusos hicieron de ella un arma biológica en plena Guerra Fría. La cepa actual de Suecia causa síntomas seudogripales durante una semana más o menos. No se sabe con certeza el mecanismo que permite proliferar a los mosquitos y la tularemia, pero las temperaturas altas que imperan bien entrado el verano parecen ser la clave, afirma Anders Sjöstedt, de la Universidad de Umeå. Y la situación no tiene visos de mejorar. Los modelos elaborados por él y otros investigadores predicen que a finales de siglo la temporada de brotes pasará de durar tres semanas y media a más de seis semanas y media en las comarcas con mayor riesgo.

Por desgracia, el peligro para los humanos no acaba ahí. El calentamiento alterará el hábitat de la fauna autóctona de tal modo que podría favorecer la transmisión de enfermedades a las personas. Durante el invierno de 2006-2007, el norte de Suecia sufrió una epidemia inusitada de hantavirus que afectó a casi medio millar de personas. El patógeno se transmite por la inhalación de orina o heces de roedores infectados y causa nefropatía epidémica, un tipo de fiebre hemorrágica potencialmente mortal. Hasta el 30 por ciento de los afectados fueron hospitalizados y se tiene constancia de tres fallecimientos.

Los patólogos acabaron descubriendo la razón más probable de la epidemia: unas temperaturas atípicas que provocaron lluvias en lugar de nevadas en pleno invierno. El hantavirus es endémico en el topillo rojo, un roedor que busca cobijo de los depredadores y del frío glacial bajo el manto nival. Ahora que el suelo del norte de Suecia permanece sin nieve 25 de cada 31 días, los topillos tal vez se refugian en graneros y casas, donde pueden infectar a sus moradores. Suecia tendrá en el futuro inviernos más templados y lluviosos.

UNA FOCA MATA A OTRA

Las migraciones terrestres no son la única fuente de preocupación. Los peces y los mamíferos marinos se están desplazando en masa hacia los polos en busca de aguas más frías a medida que los océanos de latitudes medias se calientan. Cada vez se descubren más patógenos en las aguas polares. Por ejemplo, los bancos de bacalao, uno de los principales recursos pesqueros del mundo, siguen internándose más y más en el Ártico y alcanzan niveles de récord en el mar de Barents, al noreste de Noruega. Los peces llevan consigo virus a modo de polizones. Y los depredadores van a la zaga, con más de lo mismo.

A veces, en cambio, sucede lo contrario: un patógeno autóctono halla terreno abonado en los recién llegados. Las focas grises, por ejemplo, siguen los bancos de peces en su migración hacia el norte en busca de alimento. En febrero de 2012 cuatrocientas crías de esta especie murieron en la isla de Hay, en la costa de Nueva Escocia; cerca de la sexta parte de las que nacen cada año en circunstancias normales. Los científicos señalan como culpable a *Sarcocystis canis*, un parásito unicelular emparentado con el causante de la malaria. *S. canis* no es siempre mortal, pero en ciertas poblaciones causa epidemias masivas y gran mortandad.

Tras el análisis detallado de una docena de mamíferos marinos del Ártico, se ha hallado a la presunta culpable: la foca ocelada. Esta especie pasa la mayor parte del tiempo en la banquisa marina y abunda en el ártico canadiense. Estudios que se publicarán en breve indican que es portadora del parásito y, o bien lo contagia, o bien actúa como «hospedador definitivo»; es decir, el parásito consuma la reproducción sexual en su interior y se dispersa en el entorno a través de las heces en forma de huevos infecciosos u ovoquistes. Estos últimos pueden infectar a otros animales, como las focas grises, a las que provocan una parasitosis manifiesta, explica Katie Haman, veterinaria y doctoranda de la Universidad de Columbia Británica. Por primera vez, las focas oceladas conviven con las grises, asegura Grigg, asesor de Haman. Los pescadores de Terranova lo confirman. Los investigadores esperan encontrar excrementos de foca ocelada que contengan ovoquistes, lo que confirmaría su papel de hospedador definitivo del parásito.

De modo inquietante, en todos los mamíferos marinos árticos que el equipo de Grigg examinó, se hallaron patógenos microbianos hasta entonces desconocidos. En su opinión, el Ártico es como un libro sin abrir cuyo contenido ignoramos para perjuicio nuestro.

LA BIOSEGURIDAD ES NECESARIA

Durante milenios, las gélidas temperaturas, la nieve, el hielo y la baja densidad de población han mantenido a raya las infecciones en el Ártico. La fauna autóctona ha crecido en un medio casi exento de enfermedades y con escasa diversidad. Hay quien piensa que las aves comenzaron a migrar cada año hacia el norte para poder invertir todo el vigor primaveral en la procreación, en lugar de malgastarlo en la lucha contra los parásitos y los depredadores.

Ahora está en marcha una remodelación caótica de los factores que influyen en las enfermedades, que los científicos denominan con frialdad «reorganización ecosistémica». La fauna se entremezcla de un modo nunca visto, como los avistamientos de combates y de cópulas entre osos polares y pardos en Kaktovik, Alaska. O la inaudita arribada de 20.000 morsas a una playa de Alaska en 2011 porque los témpanos flotantes del mar de Chukchi donde residen en verano se habían derretido. Los investigadores alertan que la llegada de forasteros, la sobrepoblación y el estrés son factores que agravan el riesgo de propagación de enfermedades.

La precaria salud del Ártico es consecuencia de una tendencia mucho más amplia en la que el mundo entero afrontará un repunte de las enfermedades por el cambio climático. Los virus, los hongos y los parásitos no solo están invadiendo el círculo polar, sino también ecosistemas tropicales como los arrecifes coralinos y las selvas. A su vez, los patógenos tropicales se están desplazando a latitudes templadas; en Florida y Texas comienzan a aparecer casos de dengue.

A decir verdad, el Ártico no se halla en estado crítico a causa de las enfermedades contagiosas porque hasta la fecha los brotes han sido bastante limitados. Incluso para una parte de la fauna el alza de las temperaturas podría resultar beneficiosa. La barnacla carinegra negra halla nuevas marismas en el litoral norte de Alaska gracias a la fusión del permafrost y el hundimiento de los terrenos costeros. También es posible que algunas enfermedades disminuyan. En Alaska la rabia solo persiste en las zonas pobladas por el zorro ártico; los casos de rabia podrían disminuir si el zorro común prolifera y acaba desplazándolo, explica Karsten Hueffer, profesora de microbiología de la Universidad de Alaska en Fairbanks.

Aun así, se están descubriendo males sorprendentes en la fauna boreal: osos polares con alopecia y aves marinas con cólera aviar. Resulta difícil saber si estos ejemplos se están multiplicando o simplemente salen a la luz debido al creciente número de investigadores en la región. Pero los expertos coinciden en que se necesita más información básica sobre la situación de las enfermedades. Algo nada sencillo: el Ártico es vasto y remoto, los desplazamientos son costosos y las labores de estudio no están exentas de peligro. Pero, por su larga experiencia, presienten un grave problema en ciernes.

Intensificar los estudios ayudará a consensuar soluciones internacionales para frenar la propagación de las enfermedades. «Ahora andan negociando el reparto de los recursos polares. Pero lo que deberían hacer es acordar los temas de bioseguridad», opina Heffernan de los países que plantan sus pabellones nacionales en el lecho marino y andan enzarzados en disputas por el petróleo. Se precisan estrategias para reducir la exposición a las enfermedades y evitar la introducción accidental de nuevos patógenos peligrosos para las personas y los animales. Los países tienen que comenzar a colaborar ya.

El Ártico ha permanecido aislado del resto del mundo muchísimo tiempo, aclara Grigg, parasitólogo. «Posee una dinámica propia, por lo que podríamos decir que patógenos y hospedadores han alcanzado una suerte de equilibrio.» Pero si los cambios ambientales desatan a los patógenos, la perturbación podría acabar de raíz con poblaciones enteras.

En ocasiones esas alteraciones conducen con notable rapidez a un nuevo equilibrio sin graves perjuicios; Grigg destaca la escasa repercusión del virus del Nilo Occidental en EE.UU., cuyo descubrimiento suscitó una honda preocupación. Pero, acto seguido, evoca las ratas y la peste bubónica y la devastación causada por la viruela a su llegada al Nuevo Mundo y advierte: «A veces el cambio resulta catastrófico».

PARA SABER MÁS

Phocine distemper virus in northern sea otters in the Pacific ocean, Alaska, USA. Tracey Goldstein et al. en *Emerging Infectious Diseases*, vol. 15, n.º 6, págs. 925-927, junio de 2009. **www.cdc.gov/eid**

Invasion, establishment and range expansion of two parasitic nematodes in the canadian Arctic. Susan J. Kutz et al. en *Global Change Biology*, vol. 19, n.º 11, págs. 3254-3262, 1 de noviembre de 2013.

Local Environmental Observer Network for northern communities: **www.anthc.org/chs/ces/climate/leo**

EN NUESTRO ARCHIVO

Calentamiento y vegetación ártica. Matthew Sturm en *IyC*, julio de 2010.

Infecciones que invaden el mar. Christopher Solomon en *IyC*, marzo de 2014.



ESTA IMPONENTE ATALAYA del Parque Nacional de Litchfield en Australia es obra de minúsculas termitas. Hechos con tierra, saliva y estiércol, los termiteros pueden superar los cinco metros de altura.

BIOLOGÍA

La evolución *de la* arquitectura

Las moradas construidas por los animales son fruto de la evolución tanto como ellos mismos

Rob Dunn

INGO ARNDT, NATURE PICTURE LIBRARY

EN SÍNTESIS

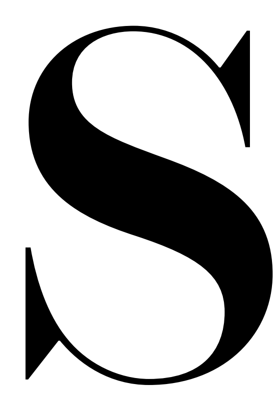
Aves, mamíferos, peces, insectos sociales y muchos otros animales construyen una amplia variedad de nidos y hogares intrincados. Hace mucho tiempo que se supone que los genes y el comportamiento han evolucionado para hacer posibles estas estructuras.

Pero solo en las últimas décadas se ha comenzado a desentrañar la genética de la arquitectura animal, la física que mantiene en pie sus creaciones y las reglas de comportamiento sorprendentemente simples que hacen posible la ejecución de verdaderas megalópolis por las brigadas de insectos.

Tal vez algún día lograremos diseñar programas informáticos inspirados en las reglas arquitectónicas de los insectos sociales para planificar ciudades más eficientes.

Rob Dunn es biólogo en la Universidad de Carolina del Norte y ha publicado artículos en *Natural History*, *Smithsonian* y *National Geographic*, entre otras revistas.





IEMPRE ME HAN FASCINADO LOS HOGARES DE LOS ANIMALES. A LO LARGO DE MI VIDA he fisgoneado en los nidos y en las madrigueras de cientos de ellos (hormigas, termitas y avispas, aves, roedores y peces), los he examinado en el laboratorio y he estudiado los trabajos de otros expertos. He cavado hoyos de metros de profundidad en busca del fondo de los hormigueros, he buceado para ver cómo excavan los nidos los peces sol (*Lepomis macrochirus*) y, en mi niñez, hasta intenté entrar a nado en una madriguera de castores.

La diversidad de formas que he descubierto en el curso de mis estudios es asombrosa. Túneles largos y rectos unos, laberintos ramificados otros, espirales sinuosas o refinadas formas fractales. Pero lo que más me sorprende de todo es su mera existencia. Cada tipo de nido es tan inherente a cada especie y a cada uno de sus integrantes como lo puedan ser las extremidades, el color de los ojos, la piel o los genes. Las instrucciones de edificación deben estar, como mínimo en parte, grabadas en los genes de los arquitectos del reino animal.

Hasta hace poco, los biólogos no habían ahondado en los orígenes y la evolución de esta arquitectura. Pero estudios recientes han localizado los primeros genes responsables del comportamiento constructor y han comenzado a desvelar los principios físicos que rigen la morfología de las moradas animales y a explicar cómo es posible que insectos de cerebros tan minúsculos puedan cooperar para construir verdaderas metrópolis. Como tantas otras buenas historias, esta comienza en un garaje.

UNA CASA PARA RATONES

Hopi E. Hoekstra era en 2003 una joven investigadora de la Universidad de California en San Diego que estaba empeñada en descubrir los vínculos entre los genes y el comportamiento de los ratones. Sabía que los ratones de especies distintas excavan túneles distintos. Jesse N. Weber, entonces estudiante en el laboratorio de Hoekstra, comenzó a preguntarse si podrían hallar los genes vinculados con la construcción de cada tipo de nido. Su primera tarea consistió en construir recintos lo bastante grandes y con la tierra suficiente para que los roedores excavasen.

Weber se las compuso para fabricar unas jaulas con madera contrachapada, clavos, arena y otros materiales baratos y asequibles. Dada la escasez de espacio en el laboratorio, las montó en el garaje de Hoekstra. El resultado no era bonito, pero sí eficaz: una serie de cajas unidas con cinta adhesiva y ambición. Hoekstra estaba estudiando los ratones patiblancos del género *Peromyscus*, por lo que Weber decidió ocupar las jaulas con dos especies: el ratón playero (*P. polionotus*) y el ratón ciervo (*P. maniculatus*). Este último, extendido por gran parte de América del Norte (excepto el extremo sudoriental), excava un solo túnel corto, mientras que el primero, presente solo en el extremo sudoriental del continente, cava una larga galería con un ramal de escape que va a morir a pocos centímetros de la superficie del suelo.

Cuando los científicos que estudian ratones de laboratorio quieren descubrir el gen que se encuentra detrás de un carácter concreto, emparejan ratones portadores de ese rasgo con otros que no lo son y observan a cuál de los progenitores se parece la descendencia. Si la nueva generación hereda el carácter, este puede estar codificado por una versión dominante de un solo gen, un alelo dominante. Este truco —que el propio Gregor Mendel empleó con sus plantas de guisantes— funciona mejor cuando las relaciones entre los genes y los caracteres son sencillas. La excavación de túneles no parece a priori un carácter sencillo que pueda estar codificado en un solo gen, pero Weber decidió probar de todos modos. Las dos especies de ratón no se aparean en estado natural, pero, como suele decirse, lo que suceda en el garaje se queda en el garaje. Weber consiguió que se aparearan y dispuso todo para que los descendientes se pusieran manos a la obra.

El resultado más previsible era que las galerías cavadas por los ratones híbridos fueran una amalgama de las construidas por sus padres, fruto de la entremezcla de un complejo conjunto de genes. Pero la primera generación híbrida construyó túneles largos dotados con escotillas de escape. En teoría, semejante resultado podía ser consecuencia de la dominancia completa en dos pares de genes: uno ligado con la longitud del túnel y el otro con la escotilla. La herencia de una o de ambas versiones dominantes del gen tunelador de los progenitores daría como resultado túneles largos, y lo mismo sucedería con el gen de la escotilla. Solo la concurrencia de dos versiones recesivas de cualquiera de los dos genes daría lugar a galerías ciegas sin vía de escape. Pero Weber y Hoekstra consideraron improbable tal sencillez.

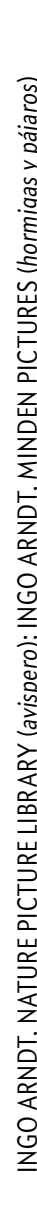
La sorpresa fue mayúscula cuando el cruzamiento de los ratones híbridos con ratones ciervo (retrocruzamiento) resultó en algo semejante a lo que cabría esperar de la dominancia completa, cuando menos en lo referente a la galería de escape. Cerca de la mitad de la progenie cavaba pasadizos de fuga y la otra mitad no. En cambio, la longitud de las galerías principales era mucho más variable, un indicio de mayor complejidad. En el trabajo de seguimiento, Weber, ahora posdoctorando en la Universidad de Texas en Austin, y Hoekstra, hoy profesora en la Universidad Harvard, acabaron acotando las regiones del genoma del ratón vinculadas con cada atributo. La construcción de la escotilla de escape se halla controlada por un grupo de genes,



HOGAR, DULCE HOGAR: Un avispero de avispa común en las primeras fases de construcción (*arriba, izquierda*); las hormigas tejedoras verdes (*Oecophylla smaragdina*) emplean seda para coser las hojas y hacer de ellas un hogar (*abajo, izquierda*); los tejedores construyen su residencia con materiales como briznas de hierba y hojas de palma (*abajo*).







INGO ARNDT, NATURE PICTURE LIBRARY (*avispero*); INGO ARNDT, MINDEN PICTURES (*hormigas y pájaros*)

o quizá por un solo gen, alojado en un cromosoma. La longitud de las galerías parece estar regida por varios genes dispersos en tres regiones del genoma, lo que explicaría la complejidad que Weber observó en sus cruzamientos.

El trabajo de Weber y Hoekstra demuestra que el comportamiento complejo que exige la construcción de madrigueras puede estar codificado genéticamente y ser el producto de fuerzas evolutivas hasta en los animales inteligentes como los ratones. Con su descubrimiento, Weber y Hoekstra estiraron el cabo suelto de un ovillo enorme. Desenmarañarlo por entero requerirá experimentos similares con cada una de las decenas de miles de especies constructoras. El equipo del laboratorio de Russell Fernald, de la Universidad Stanford, ya está explorando los genes que controlan el diseño del nido en los peces cíclidos, algunos de los cuales cavan hoyos y otros levantan montículos en el lecho. Más estudios se sucederán.

La genética de la construcción resultará sin duda en algunos animales más compleja que la de los roedores de nuestro relato. Ciertas especies como los canarios aprenden a construir los nidos (o a decorarlos, en el caso de los tilonorrincos) imitando a progenitores y congéneres. Otras, como numerosos insectos sociales, son difíciles de criar en el laboratorio. Pero la base genética no es el único misterio, ni siquiera el más enigmático, que envuelve a los arquitectos del reino animal. También está la pregunta de por qué los nidos son tan enormemente diversos en las diferentes especies y cómo explicar las particulares y peculiares formas.

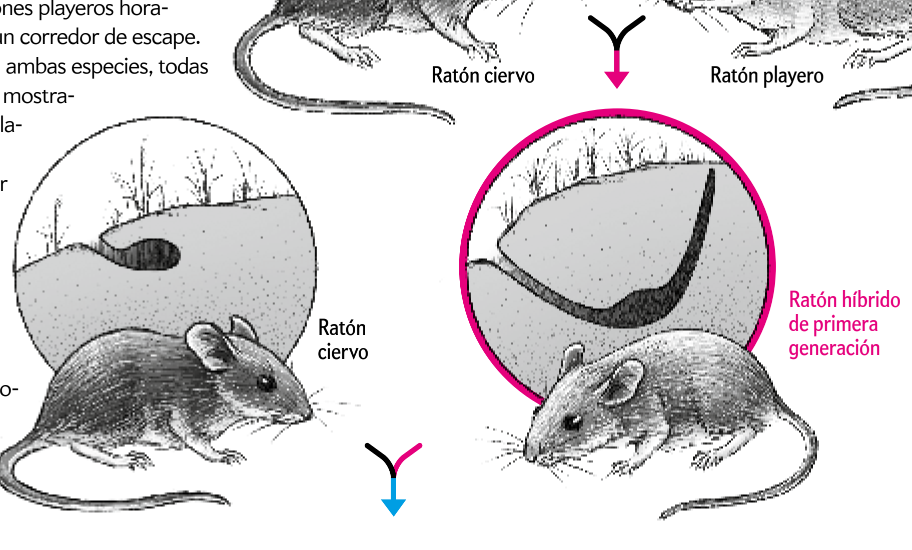
CONSTRUCTORAS DE TORRES

Las ratoneras de *Peromyscus* y las demás moradas de los mamíferos son bastante sencillas; no varían mucho entre regiones ni entre especies (un túnel más aquí, una cámara más grande allí). Incluso en las aves, la verdadera variedad en la construcción del nido es la excepción y no la norma. La mayoría de los nidos de pájaro son simples tazas, cuencos o bolsas que solo difieren en sutilezas de la forma y en los materiales utilizados, pero no en el diseño básico. Los verdaderos maestros de la arquitectura animal son los insectos sociales. La colmena, el avispero, el hormiguero y el termitero: las diferencias entre estas creaciones superan de largo las diferencias anatómicas entre los insectos creadores. Casi todas las termitas obreras lucen un aspecto similar (un abdomen flácido unido por el tórax a una cabeza redonda y mandíbulas visibles), pero sus colonias adquieren formas que recuerdan a las manchas de Rorschach, rascacielos de ocho metros de altura, cúpulas, pirámides e incluso esferas quebradizas suspendidas de los árboles.

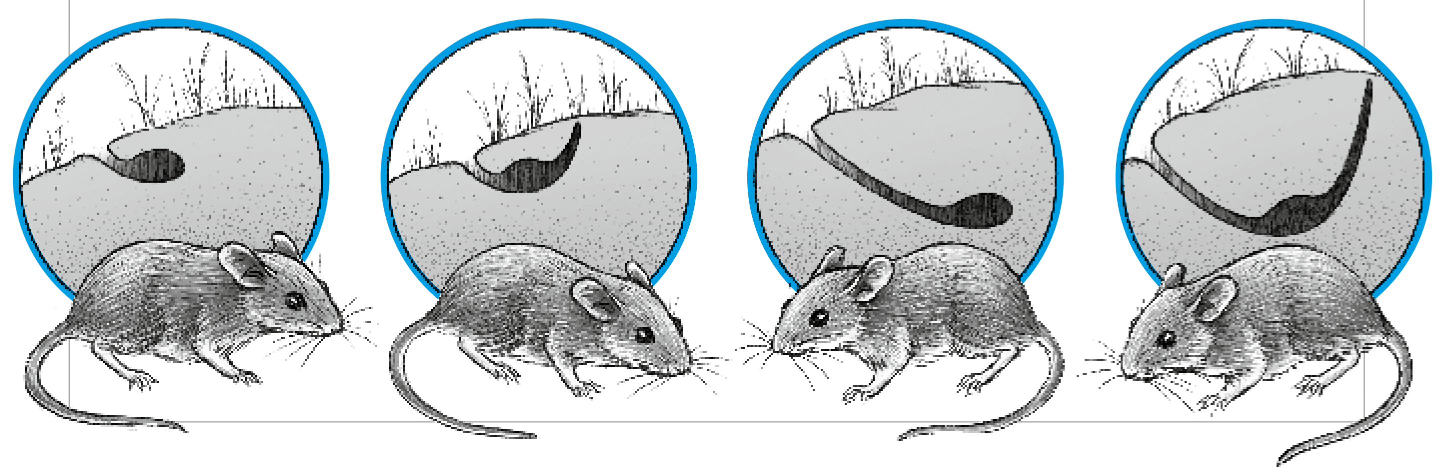
Sería fácil restar importancia a esa diversidad calificándola como accidental, la manifestación visible de una torpe masa de bichos sin consciencia. Pero en muchos casos que han sido estudiados, los nidos mostraban las mismas características en todas las colonias de la misma especie. Esta coherencia se hace extensiva a partes del nido que no parecen cumplir ninguna

Genética del comportamiento excavador

Los ratones ciervo excavan madrigueras con una sola entrada corta, mientras que los ratones playeros horadan un largo vestíbulo dotado con un corredor de escape. Cuando los investigadores cruzaron ambas especies, todas las madrigueras de la descendencia mostraron el aspecto del hogar del ratón playero. El cruzamiento de un ratón híbrido con un ratón ciervo dio lugar a una nueva generación de ratoneras más heterogéneas: cerca de la mitad cavó el corredor de huida, pero la longitud del túnel de entrada fue muy variable. Esto indica que tanto la longitud de las galerías como la presencia de la escotilla de escape son rasgos heredados a través de genes —como el color de los ojos—, pero que la genética de la longitud del túnel principal es más compleja.







JILLIAN WALTERS

función, como las cámaras desocupadas. Pero las termitas las levantan una y otra vez para nuestro desconcierto. En los últimos años ha comenzado a desvelarse el propósito de esas cámaras.

Ese enigma arquitectónico resulta especialmente patente en las colonias de *Macrotermes bellicosus*, termita que cultiva y cosecha hongos del género *Termitomyces* en el interior del termitero. Alrededor de los huertos y de los millones de termitas a su cargo se alzan torres centrales de picos puntiagudos y cerrados. Les circundan las cámaras habitadas por las obreras y la propia reina, rodeadas de un perímetro exterior de cámaras desocupadas. Las obreras recubren esas cámaras vacías con una superficie dura y porosa a prueba de depredadores pero permeable al aire.

A Judith Korb, de la Universidad de Ratisbona, le interesan sobre todo esas estructuras de los termiteros gigantes de *Macrotermes*. Con la ayuda de sensores de temperatura, colaboradores y horas de pico y pala, Korb ha descubierto que el inusual rasgo arquitectónico de los termiteros actúa como un gigantesco pulmón de barro. Durante el día, el aire caliente saturado con el dióxido de carbono exhalado por las termitas asciende hacia el centro del termitero. Allí, en el tramo más angosto del montículo, el aire caliente y el CO_2 se dispersan hacia arriba. Si no fuera así, sus ocupantes se asfixiarían en su propia exhalación. Con la caída de la noche, el aire fresco y oxigenado penetra por la base del termitero a través de las cámaras exteriores vacías y desplaza el aire viciado hacia afuera. Este gran pulmón de barro está adaptado al clima donde viven las termitas *Macrotermes*. Lejos de ser accidentales e inútiles, las cámaras vacías facilitan la ventilación de la colonia.

Además de controlar el microclima, los termiteros resguardan a sus constructoras de los enemigos. Las paredes son tan gruesas para resistir el minado de los cerdos y los osos hormi-

gueros, los armadillos, los equidnas y un pequeño ejército de otros animales para los que las termitas son un bocado predilecto. A fin de proteger a las larvas de los parásitos, un véspido recién descubierto y bautizado como avispa sepulturera tapia la entrada del nido con pilas de hormigas muertas que emanan un olor penetrante. Aparte, por supuesto, está el túnel de escape. El ratón playero habita en el sudeste de EE.UU., donde las serpientes abundan en número y variedad. Casi con seguridad la escotilla de escape es un recurso contra ellas. En fecha reciente se ha descubierto que algunas hormigas tropicales depositan un guijarro junto a la boca del hormiguero y taponan la entrada con él cuando merodean cerca las temibles hormigas legionarias. Otras se defienden contra ellas con hormigas soldado cuyas enormes cabezas encajan en la boca de entrada. Algunas aves protegen el nido camuflándolo o construyendo nidos disimulados, como el del corredor sahariano, apenas una somera escarbadura circundada de guijarros en la arena del desierto.

Quizás el mayor problema para los arquitectos de la naturaleza sea uno en el que los científicos apenas han comenzado a reparar: mantener a raya a los enemigos invisibles, como las bacterias y los hongos microscópicos. En los últimos años se ha descubierto que algunas termitas construyen la colonia con sus propios excrementos mezclados con otros materiales. En estos «ladrillos» de heces, algunas siembran un huerto de actinobacterias que combaten los hongos mortíferos con la secreción de antifúngicos. Las hormigas cortahojas cultivan bacterias defensivas similares sobre su propio cuerpo.

CONSTRUCCIÓN EN COMUNIDAD

Una vez entendidas las condiciones ambientales y las amenazas que han favorecido un tipo concreto de vivienda y los genes vinculados con ella, queda por desentrañar cómo esos genes dirigen al animal a través del proceso de construcción. En el caso de los insectos sociales, resulta tentador pensar que la colonia obedece ciegamente a un gobernante, una reina voluminosa con un plan preconcebido. Pero no existe un plan maestro, solo las acciones inconscientes de una legión de individuos que siguen unas normas sencillas y que, cuando actúan en concierto, dan lugar a las enormes colonias de termitas, los cavernosos laberintos de las hormigas o los intrincados panales de las abejas.

A lo largo de los últimos quince años se han concebido refinados modelos matemáticos que imitan algunas de las sencillas reglas de construcción de los termiteros. Los modelos suponen que los bloques de construcción que colocan las termitas contienen una feromona que incita a seguir colocando nuevos bloques y que acaba por disiparse: una obrera deposita un bloque y otra la secunda guiada por el olor que emana de él. El proceso continúa hasta que las dos paredes curvas confluyen y forman el techo. La construcción de paredes y techos es fácil de simular, pero ¿qué decir de la colocación precisa de esas paredes para dar forma a galerías y salas?

También en ese caso las reglas sencillas parecen ser el fundamento de la complejidad, aunque siguen saliendo a la luz nuevos detalles de la historia. En lo que concierne a la cámara real (la sala oval que acoge a la termita reina), la reina segregaría una feromona que impediría que las obreras levanten los muros a corta distancia de ella. Los expertos no creen haber desvelado el método exacto de construcción de las termitas y las avispas, sino el mínimo de reglas necesarias para construir algo tan perfecto como un termitero o un avispero. Serían muy pocas, codificadas en los genes y en los minúsculos cerebros de estos insectos.

En comparación con los hogares de los roedores y los insectos sociales, tan diversos, genéticamente codificados y construidos a menudo en cooperación, los nidos de los primates son humildes. Los chimpancés y los gorilas arrancan hojas para hacer un lecho; uno de mis colegas ha dormido en uno de estos y lo califica como «cómodo» a falta de algo mejor. Probablemente nuestros antepasados no durmieron en nada muy distinto hasta que en algún momento la humanidad comenzó a construir en serio. Haciendo uso del lenguaje para coordinar los esfuerzos, nuestros ancestros improvisaron una morada con lo que tenían a mano: ramas, barro, hierba y hojas. Ningún gen codifica el diseño preciso de esos cobijos. Si observa imágenes de viviendas indígenas de todo el mundo comprobará que en gran medida la forma obedece a la funcionalidad y la necesidad. En las regiones frías, las paredes son gruesas; en las cálidas, ni siquiera se levantan. Verá casas tradicionales que imitan los termiteros, los hormigueros e incluso, en climas fríos, la techumbre de hierba propia de los nidos de abejorros.

Cuanto más tiempo dedicamos a reflexionar sobre los métodos constructivos, más funciones otorgamos a las viviendas hasta el punto de convertirlas en símbolos de estatus, obras de arte e iconos culturales. Las residencias de algunos parajes de la tórrida Arizona apenas se diferencian de las levantadas en la fría Nueva York porque la sociedad nos mueve a desear el mismo estilo de vida —el mismo hogar y la misma cerca blanca de madera— sin reparar en el lugar, el clima, los depredadores, los patógenos ni ningún otro condicionante. Hemos alejado a la arquitectura de la mayoría de los imperativos naturales.

Por fortuna, desde hace pocos años ha resurgido un enfoque alternativo, un contrapunto a la tendencia de diseñar aisladamente cada estancia, cada punto de apoyo, cada puerta y jardín. Los diseños zoológicos, como ahora sabemos, emanan de genes que codifican reglas sencillas. Si a las termitas les bastan normas simples para erigir megalópolis, nosotros podríamos hacer lo mismo. Algunos arquitectos lo están intentando. Adaptar las sencillas reglas de los insectos sociales a las ciudades humanas requiere una potencia de cálculo tremenda, pero esa posibilidad está cada vez más al alcance de la mano. El quid de la cuestión estriba en saber qué decisiones sencillas habremos de adoptar, en qué situaciones será mejor actuar como una termita, una hormiga o una abeja. Nunca hemos estado tan cerca de las respuestas. Pero al contemplar las megalópolis de barro y saliva que se elevan del suelo bocado a bocado uno se da cuenta de que las técnicas arquitectónicas más antiguas del planeta siguen siendo un misterio apenas desvelado.

PARA SABER MÁS

Nest-building fish, gasterosteidae. A. W. Roberts en *Scientific American*, mayo de 1880.

Discrete genetic modules are responsible for complex burrow evolution in *Peromyscus* mice. Jesse N. Weber, Brant K. Peterson y Hopi E. Hoekstra en *Nature*, vol. 493, págs. 402-405, enero de 2003.

The evolution of burrowing behavior in deer mice (genus *Peromyscus*). Jesse N. Weber y Hopi E. Hoekstra en *Animal Behaviour*, vol. 77, n.º 3, págs. 603-609, marzo de 2009.

EN NUESTRO ARCHIVO

Moradas en los árboles. Nina Bai en *IyC*, agosto de 2011.

El arte de construir un nido. Guy Théraulaz, Andrea Perna y Pascale Kuntz en *IyC*, diciembre de 2013.

COMPUTACIÓN

Las intrigantes matemáticas de Candy Crush

Tras este juego de apariencia simple se esconden algunos de los problemas de cómputo más difíciles que se conocen. Tal vez por eso resulte tan adictivo

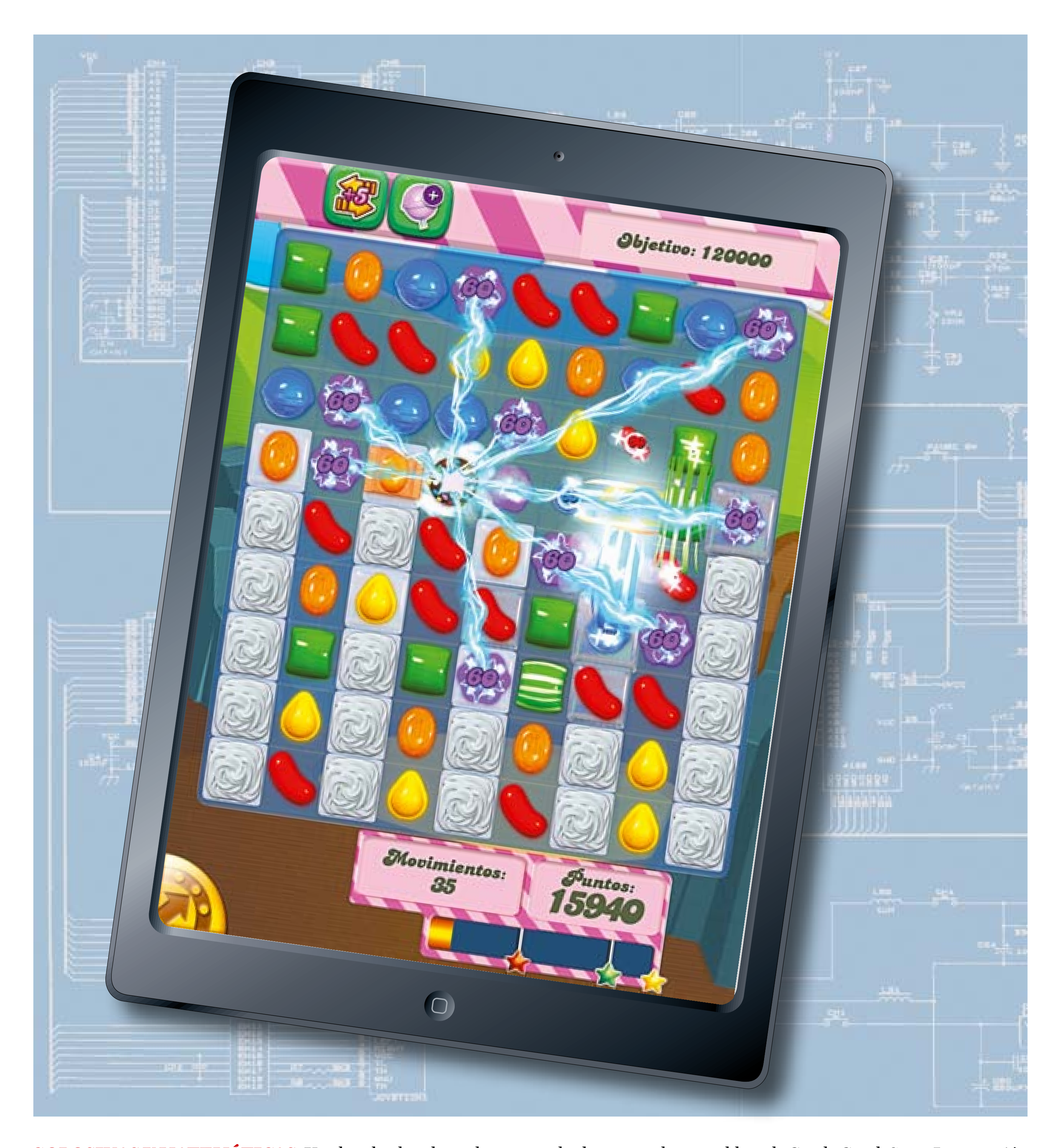
Toby Walsh

SE HA DICHO QUE, EN UNA CIUDAD, UNO NUNCA ESTÁ A MÁS DE UNOS POCOS PALMOS DE UNA rata. Pero hoy en día tal vez deberíamos decir que nunca estamos a más de unos palmos de alguien jugando a Candy Crush Saga. En estos momentos es el juego más popular en Facebook. Se ha descargado e instalado en móviles, tabletas y ordenadores más de quinientos millones de veces. Gracias a ese éxito, su desarrollador, Global King, irrumpió hace poco en la Bolsa de Nueva York con una oferta pública inicial que valoró la compañía en miles de millones de dólares. Nada mal para un pasatiempo consistente en intercambiar la posición de unos caramelos para formar cadenas de tres o más golosinas idénticas.

Gran parte de la atracción de Candy Crush se debe a que, a pesar de su aparente simplicidad, se apoya en bases muy complejas. Sorprendentemente, el juego también ha despertado gran interés entre los investigadores, ya que pone en perspectiva uno de los problemas abiertos más importantes de la matemática y de la seguridad en los sistemas informáticos.

En un trabajo reciente, demostré que Candy Crush constituye un rompecabezas matemático muy difícil de resolver. Para ello recurrí a uno de los conceptos más importantes y bellos de las ciencias de la computación: la reducción de un problema, consistente en transformar un problema en otro o, como gusta decir a los informáticos, «reducir» un problema a otro. En el fondo, la idea emana de la versatilidad del código informático: el mismo código puede emplearse para resolver más de un problema, incluso si las variables difieren. Si comenzamos con un problema difícil y lo reducimos, el problema que obtendremos será, por lo menos, tan complejo como el original. La versión transformada no puede resultar más sencilla, ya que se supone que somos capaces de solucionar el primer problema con un programa de ordenador que puede resolver también el segundo. Y, si lo pensamos al revés —es decir, que el segundo problema también puede reducirse al primero—, llegaremos a la conclusión de que, en cierto sentido, ambos revisten una dificultad semejante, por lo que tardaremos tiempos similares en solucionarlos.

Determinar la dificultad de un problema constituye una cuestión fundamental en matemáticas. No se trata de un mero aspecto semántico. Si podemos clasificar un problema por lo difícil que resultará resolverlo, sabremos qué potencia de cómputo necesitaremos e incluso si vale la pena intentarlo. De modo que, al menos para los matemáticos, considerar Candy Crush como un problema matemático puede ser tan adictivo como jugarlo.



GOLOSINAS Y MATEMÁTICAS: Una bomba de colores destruye todas las moras de este tablero de Candy Crush Saga. La atracción que despierta este juego se debe, en parte, a que su estructura subyacente corresponde a uno de los problemas computacionales más complejos que existen.

CORTESÍA DE GLOBAL KING

SOLUCIONES DIFÍCILES, COMPROBACIONES FÁCILES

Al analizar Candy Crush junto con mis colaboradores, comenzamos por considerar la clase más famosa de problemas complejos de cómputo. Estos reciben el nombre de NP, por «tiempo polinómico no determinista» en inglés. Aquí el término «tiempo» hace referencia a cuánto tardaremos en resolver el problema en cuestión. La clase NP incluye todos aquellos problemas para los que, si alguien nos da la solución, podremos verificar con rapidez que es correcta; es decir, hacerlo nos llevará un tiempo que solo será una función polinómica del tamaño del problema. No obstante, hallar la solución partiendo de cero plantea todo un reto computacional. Un gran número de problemas matemáticos bien conocidos, como determinar si una fórmula lógica compleja puede ser satisfecha o no, o si podemos colorear un grafo de forma que los nodos vecinos muestren siempre colores distintos, pertenecen a esta clase de problemas computacionales difíciles.

Toby Walsh es director de investigación en el Laboratorio Neville Roach de Tecnologías de Información y la Comunicación de Australia (NICTA). Pertenece también al departamento de ciencias e ingeniería de la computación de la Universidad de Nueva Gales del Sur.



En lo que respecta a su complejidad, por debajo de la clase NP tenemos los problemas de cómputo «fáciles», o de clase P. En este caso, la P solo indica «polinómico». Este grupo incluye problemas como ordenar una lista o encontrar un registro en una base de datos. Un programa informático eficiente tardará poco en resolverlos, incluso en el peor de los casos. Desde un punto de vista matemático, el tiempo de resolución crece de manera polinómica con el tamaño del problema. Por ejemplo, un conocido algoritmo para ordenar listas, llamado ordenación de burbuja o método de intercambio directo, intercambia los elementos consecutivos de una lista si están en orden equivocado (lo que hace que algunos datos se «eleven» a lo largo de la lista, como si fueran burbujas). Esta manera de proceder permite concluir la tarea en un tiempo que aumenta como el cuadrado del tamaño de la lista que deseemos ordenar. Si doblamos el número de elementos, el algoritmo tardará, en el peor de los casos, cuatro veces más. El caso más desfavorable se da cuando la lista inicial se encuentra justo en el orden inverso al de la lista ordenada, lo que obliga al algoritmo a elevar cada elemento. Si partimos de otra situación, el algoritmo concluirá antes.

Existen problemas incluso más difíciles que los de tipo NP. De hecho, hay problemas para los que nuestros estándares de computación, aquellos por los que se rigen nuestros ordenadores, no sirven en absoluto. En tales casos no existe ningún programa informático que garantice una respuesta en un tiempo finito. Estos pertenecen a la clase de problemas indecidibles, la cual incluye cuestiones como determinar si un programa dado terminará en algún momento o si, por el contrario, caerá en una especie de bucle sin fin; lo que los teóricos de la computación conocen como el problema de la detención. Alan Turing, uno de los padres de la computación, demostró que el problema de la detención es indecidible: no puede existir ningún programa informático que, para todos los programas posibles, incluido él mismo, sea capaz de determinar si se pararán o no.

La clase NP se ubica en la frontera que separa los problemas fáciles de los difíciles. Dentro de NP existen multitud de problemas que constituyen verdaderos retos; entre ellos, determinar las rutas óptimas para camiones de reparto, organizar turnos de personal o concertar el horario de clases en un colegio. Candy Crash pertenece a esta categoría de problemas NP difíciles. Cualquiera de ellos puede reducirse a cualquier otro, por lo que, en este sentido, resultan igualmente complejos.

Por desgracia, los mejores programas informáticos de los que disponemos requieren tiempos de ejecución que crecen drásticamente conforme aumentamos el tamaño de un problema de tipo NP. En mi ordenador tengo un programa que tarda pocas horas en encontrar la ruta óptima para diez camiones y demostrar que se trata de la mejor solución posible. Pero, para cien camiones, el mismo programa tardaría más que la edad del universo. Ello se debe a que el tiempo de ejecución de dicho programa crece exponencialmente con el tamaño del problema.

Las funciones exponenciales crecen muy rápido. Así lo ilustra la conocida fábula del visir al que un sultán le concede como premio cualquier cosa que pida. El visir le pregunta si le otorgaría un grano de trigo por el primer escaque de un tablero de ajedrez y, en cada uno de los siguientes, el doble que en el anterior. El sultán razona que, puesto que se trata de un grano de trigo en el primer escaque, dos en el segundo, cuatro en el tercero, y así sucesivamente, no parece un gran premio. Pero comete un error colosal, ya que, en el escaque 64, el último del tablero, se alcanza el número 18.446.744.073.709.551.615: más de 18 trillones de granos, lo que equivaldría a la cantidad de trigo producida en todo el planeta durante cientos de años. Las exponenciales superan nuestra intuición de una manera asombrosa.

Aunque la mayoría de los teóricos de la computación estarían de acuerdo con que los problemas NP se sitúan en la frontera entre lo fácil y lo muy difícil, dado un problema específico, no hay forma de saber con seguridad en qué lado se encontrará. Los mejores algoritmos a nuestra disposición tardan un tiempo exponencial en resolver problemas NP. Pero no sabemos si habrá algún algoritmo exótico aún por descubrir capaz de concluir en tiempo polinómico. Los matemáticos abrevian esta cuestión con la pregunta de si P = NP. Hoy por hoy, esta constituye una de las cuestiones abiertas más importantes de la matemática. Tanto es así que el Instituto Clay ha prometido un millón de dólares a quien encuentre la respuesta. Y aunque la oferta está en pie desde el año 2000, el premio sigue desierto.

En la última encuesta entre especialistas acerca de si P = NP, el 83 por ciento respondió que no creía en la igualdad entre ambas clases de problemas. Eso significa que piensan que no existen algoritmos eficientes para resolver problemas NP y que nunca los habrá. Ante la pregunta sobre cómo llamar a los problemas que, pertenezcan o no a NP, resultan al menos tan difíciles como los de tipo NP, acabaron decantándose por un prosaico «NP-difícil» (*NP-hard*). Con todo, este segundo sondeo reveló un curioso sentido del humor. Algunas propuestas alternativas fueron «NP-irrealizables» (*NP-impractical*), «NP-enrevesados» (*NP-tricky*) y «NP-tocanarices» (*NP-hard-ass*).

La idea de reducción de un problema desempeña un papel fundamental en la cuestión de si P = NP. Si encontrásemos un algoritmo eficiente para solucionar un problema de NP, entonces podríamos resolver todos ellos de manera eficiente. En tal

EN SÍNTESIS

Los problemas computacionales pueden agruparse en distintas categorías atendiendo al tiempo que necesitará un ordenador para resolverlos. Dos grandes clases de problemas son los de tipo P, o «fáciles», y los de tipo NP, o «difíciles».

Un trabajo reciente ha analizado la complejidad computacional de Candy Crush. Al describir el juego en términos de un circuito con puertas lógicas, el autor ha demostrado que pertenece a la clase de problemas más difíciles dentro de NP.

Al igual que los populares *captchas* ayudan a Google a digitalizar manuscritos, tal vez los millones de horas que los humanos dedican a resolver tableros de Candy Crush puedan «reutilizarse» para abordar otros problemas igualmente complejos.

caso, el mundo se convertiría en un lugar muy distinto del que conocemos. Las buenas noticias serían que aprovecharíamos mucho mejor el tiempo: nuestros camiones de reparto seguirían rutas óptimas, los vuelos se programarían de manera impecable y los turnos de personal serían perfectos. También ganaríamos siempre en Candy Crush. Sin embargo, nuestras contraseñas y cuentas bancarias dejarían de ser seguras, porque descifrarlas habría dejado de suponer un reto. La complejidad computacional puede ser tanto un infierno como una bendición. Queremos estar seguros de que los piratas informáticos lo tendrán muy difícil a la hora de descifrar un código; sin embargo, hemos de poder cifrarlos con rapidez.

El ejemplo anterior tal vez le traiga a la cabeza la definición de problemas de tipo NP: aquellos cuya respuesta es fácil de verificar pero difícil de encontrar. La criptografía consiste en poner barreras computacionales a los amigos de lo ajeno. Si tales impedimentos desaparecieran, el mundo moderno se vería en grandes apuros.

CARAMELOS Y CIRCUITOS

Para demostrar que Candy Crush equivale a un problema matemático de gran complejidad, podríamos reducirlo a cualquier problema NP. Para simplificar las cosas, nuestra investigación partió del antepasado de todos los problemas NP: el problema de satisfacibilidad, o de encontrar la solución de una fórmula lógica. El lector se habrá enfrentado a esta clase de problemas si alguna vez ha intentado resolver un pasatiempo de lógica en el que debe decidirse qué proposiciones son verdaderas y cuáles falsas para satisfacer un conjunto de fórmulas lógicas: si el inglés vive en la casa roja, el español es el dueño del perro y el noruego vive junto a la casa azul, ¿es cierta o falsa la proposición de que el español es el dueño de la cebra?

Para reducir un rompecabezas lógico al juego de Candy Crush, podemos recurrir a la conocida relación entre lógica y circuitos eléctricos. Toda fórmula lógica puede representarse mediante un circuito; al fin y al cabo, los ordenadores no son más que una gran colección de puertas lógicas (AND, OR y NOT) conectadas por cables. Por tanto, todo lo que necesitamos demostrar es que podemos construir un circuito eléctrico equivalente a Candy Crush.

En primer lugar, necesitamos una placa base sobre la que construir el circuito. Esta debe corresponder a una distribución neutral de caramelos, donde la disposición relativa de las golosinas permanezca estática y nunca pase nada. La que reproducimos en la figura de la derecha recuerda a las luces de los semáforos: en las columnas impares alternamos gominolas rojas y lágrimas de limón amarillas, y en las pares, pastillas naranjas y chicles verdes. Con este tablero de fondo, incluso si movemos las columnas hacia arriba o hacia abajo nunca obtendremos una cadena de tres caramelos idénticos.

Sobre ese marco insertaremos los componentes eléctricos, que en nuestro caso estarán formados por moras. Colocar una mora en una casilla no sustituye al caramelo que se encontraba allí, sino que lo desplaza junto con todos los siguientes. Ahora, el contacto entre moras crea un cableado que conduce señales a lo largo del circuito. Si situamos una mora en la entrada del cableado, a la izquierda, formaremos una cadena de tres de ellas. Según la regla básica del juego, esta desaparecerá, lo que hará caer los caramelos de las columnas afectadas y propagará la señal a lo largo del cableado. Al final, aparecerá una mora en la salida, a la derecha. De esta manera, una señal se habrá transmitido por la placa base.

REDUCCIÓN DE PROBLEMAS

Candy Crush como circuito lógico

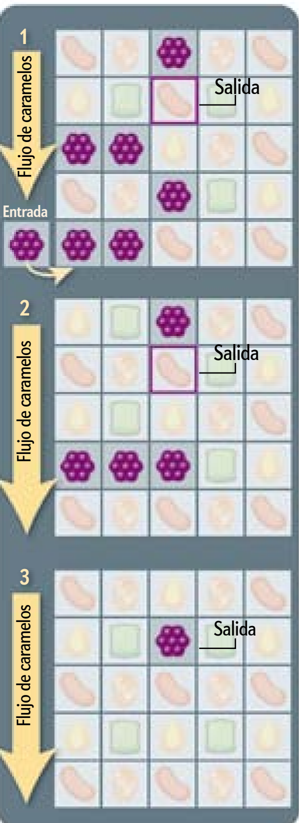
Para demostrar que Candy Crush pertenece a la clase de problemas de tipo NP, el autor ha establecido una correspondencia entre las reglas del juego y un circuito eléctrico con puertas lógicas. Un tablero de Candy Crush puede verse como un circuito lógico con varios elementos básicos (*izquierda*) por el que se propagan señales (*derecha*).

Componentes



La placa base contiene una configuración de caramelos que permanece estática según las reglas del juego (*arriba*). El cableado se compone de moras (*centro*). Un interruptor permite al usuario decidir qué cables utilizar (*abajo*).

Transmisión de la señal



La señal viaja a través del cableado en un proceso iniciado por una entrada que coloca tres moras en fila; según una de las reglas básicas del juego, estas desaparecerán (*arriba*). Como consecuencia, dos moras caen (*flechas de flujo*), lo que produce una nueva fila de tres de ellas (*centro*). Cuando esta desaparece, una mora acaba en el lugar de salida de la señal (*abajo*), lo que completa la transmisión.

También necesitamos interruptores que permitan al usuario decidir qué conexiones están activas. Estos representan la elección sobre si una proposición de nuestra fórmula booleana se establece como verdadera o falsa. En la figura, el usuario puede desplazar la mora central hacia arriba o hacia abajo, movimientos que transmitirán la señal hacia la derecha o hacia la izquierda.

COMPLEJIDAD POPULAR: Los problemas de tipo NP han permeado en la cultura popular más allá de Candy Crush. En la serie de televisión *Elementary*, una adaptación moderna de Sherlock Holmes, dos matemáticos ocultan su trabajo sobre la cuestión de si P = NP mediante rotuladores de tinta solo visible en el ultravioleta, tal y como descubre Sherlock Holmes (*imagen*) después de que los investigadores hayan sido asesinados por sus resultados.



CORTESÍA DE CBS

Por último, podemos construir puertas lógicas como AND, OR y NOT usando las moras como componentes básicos. Después solo habremos de conectar interruptores a estas puertas lógicas con conexiones lo suficientemente largas para obtener un circuito eléctrico que simula nuestra fórmula lógica. Este tendrá un bit de salida, el cual representará la verdad de la fórmula lógica.

ASOCIAR PROBLEMAS

En términos de circuitos lógicos como el que hemos descrito, el objetivo de Candy Crush consiste en decidir qué interruptores debemos activar para que las puertas lógicas disparen adecuadamente y el bit de salida cambie a verdadero. De esta forma, reducimos el problema de satisfacer una fórmula lógica al de resolver un tablero en Candy Crush. Y, dado que satisfacer una fórmula lógica es un problema difícil, también lo será Candy Crush.

También podemos demostrar el inverso: que un problema en Candy Crush puede reducirse al de satisfacer una fórmula lógica. Solo necesitamos escribir una secuencia o fórmula que represente el tablero de Candy Crush. En esencia, semejante descripción lógica de Candy Crush se encuentra en cualquier programa capaz de jugarlo.

Por tanto, Candy Crush no es más difícil, pero sí tan difícil como cualquier otro problema de tipo NP. Si hallásemos un método eficiente para resolver tableros de Candy Crush, habríamos encontrado una manera eficiente de planificar rutas de camiones, turnos de personal y horarios lectivos. De igual modo, si algún día descubriésemos un algoritmo rápido para resolver cualquiera de estos problemas, tendríamos una forma eficiente de jugar a Candy Crush. En ello reside la potencia de la reducción de problemas.

La próxima vez que no consiga resolver un tablero de Candy Crush en el número de movimientos asignado, tal vez le consuele pensar que se ha enfrentado a un problema matemático de gran complejidad. Puede que eso explique por qué este juego provoca tanta adicción. Si hubiese una estrategia sencilla para ganar, como ocurre con el tres en raya, jamás sería tan cautivador.

Gracias a la reducción de problemas, los teóricos de la computación han logrado reducir una gran cantidad de cuestiones posibles a un pequeño número de clases fundamentales, como P y NP, que los expertos han apodado «zoo de la complejidad». Hoy este zoo cuenta con unas 500 clases de problemas, algunas con nombres tan exóticos como Δ_2P, LogFew, NEEE o P-cerrado —por si aún no lo había notado, los teóricos de la computación adoran los acrónimos.

En el caso poco probable de que se demuestre que P = NP, el número de clases del zoo se reduciría de manera drástica. Muchas de las que hoy creemos distintas resultarían ser equivalentes. En cambio, si P ≠ NP, como creen numerosos expertos, ello querría decir que realmente existen múltiples clases de problemas. En cualquier caso, este particular bestiario continúa creciendo. Hace poco, se han identificado nuevas clases para describir la complejidad de aquellos problemas que podría resolver un ordenador cuántico.

La reducción de problemas ofrece una intrigante posibilidad para los adictos a Candy Crush. ¿Sería posible aprovechar los millones de horas que los humanos invertimos en alinear caramelos? Tal vez la reducción de problemas pueda explotarse para redirigir la resolución de tableros de Candy Crush a otros problemas de cómputo. La idea no es nueva. Cada vez que entramos en una página web y demostramos que somos una persona y no un bot resolviendo un CAPTCHA (las imágenes distorsionadas de una palabra o un número que debemos teclear), nuestra respuesta ayuda a Google a digitalizar todo tipo de documentos, desde periódicos hasta manuscritos antiguos. Tal vez podríamos aprovechar los tableros de Candy Crush para usos similares.

Nuestras investigaciones sobre Candy Crush nos han hecho respetar profundamente este pasatiempo de apariencia inocua. Su funcionamiento arroja luz sobre una de las cuestiones abiertas más importantes de la matemática, cuyas implicaciones se extienden a todo tipo de aplicaciones, como los algoritmos de cifrado que permiten mantener a salvo nuestras cuentas bancarias. Tal vez quiera explicárselo a su jefe la próxima vez que este le sorprenda intentando llegar «solo al siguiente nivel».

PARA SABER MÁS

Candy Crush is NP-hard. Toby Walsh en **arxiv.org/abs/1403.1911**

EN NUESTRO ARCHIVO

P = NP. Agustín Rayo en *IyC*, abril de 2010.
Máquinas del infinito. John Pavlus en *IyC*, noviembre de 2012.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

Tras el rastro de los axiones

La materia oscura podría estar compuesta por partículas ultraligeras. Varios experimentos presentes y futuros intentarán detectarlas

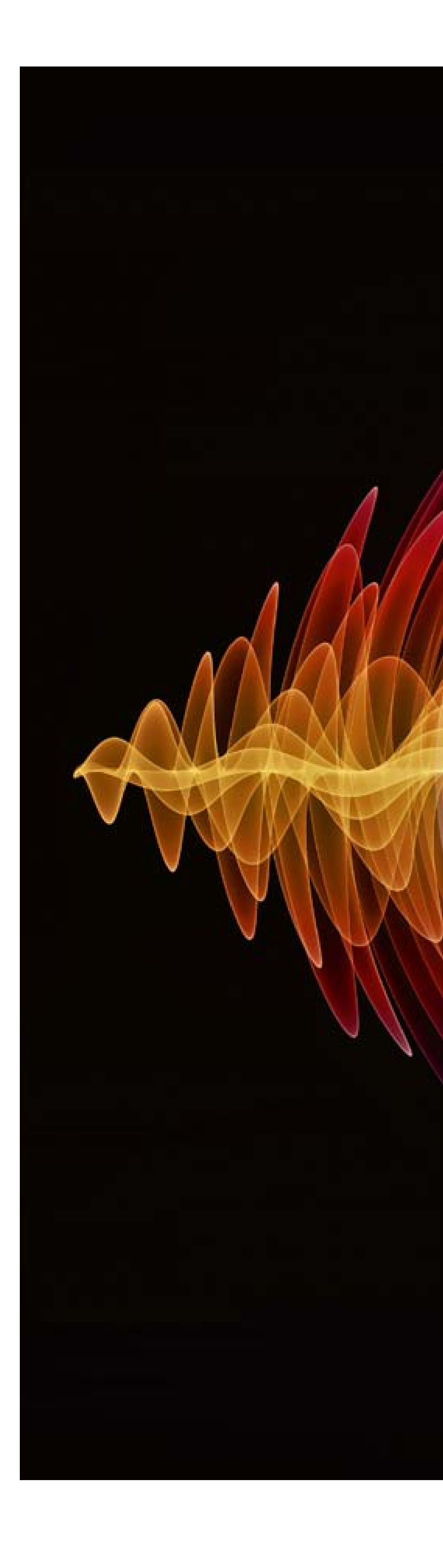
Joerg Jaeckel, Axel Lindner y Andreas Ringwald

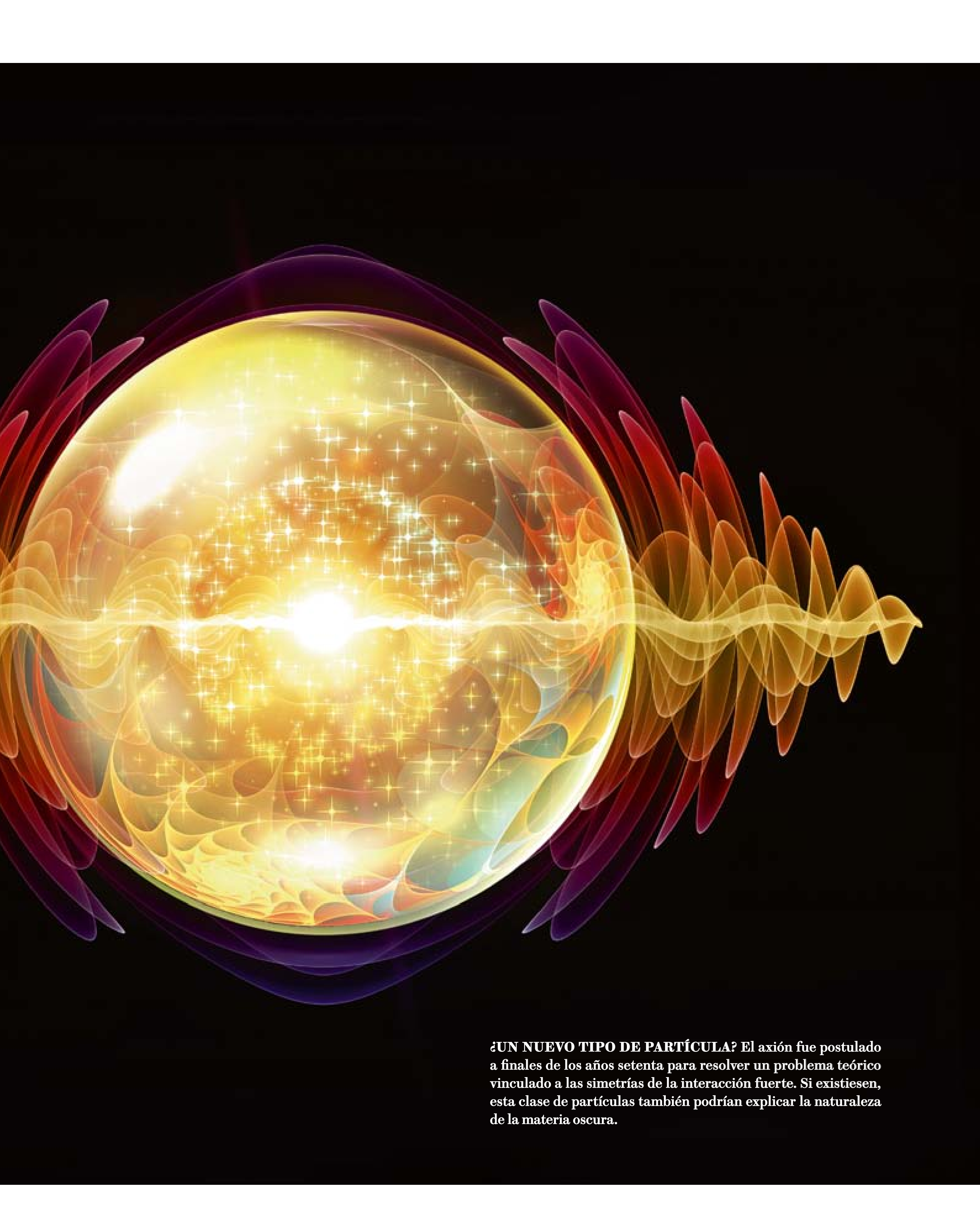
EN SÍNTESIS

En la búsqueda de física más allá del modelo estándar, la mayoría de los esfuerzos experimentales se han centrado en producir nuevas partículas cada vez más masivas. ¿Merece la pena buscar también partículas ultraligeras?

Una de tales partículas es el axión, postulado a finales de los años setenta para resolver cierto problema relacionado con las simetrías de la interacción fuerte. Los axiones podrían, además, dar cuenta de la materia oscura.

Distintas extensiones del modelo estándar predicen la existencia de partículas ultraligeras similares al axión. Varios experimentos en curso y otros previstos para los próximos años se proponen buscar estas esquivas partículas.





¿UN NUEVO TIPO DE PARTÍCULA? El axión fue postulado a finales de los años setenta para resolver un problema teórico vinculado a las simetrías de la interacción fuerte. Si existiesen, esta clase de partículas también podrían explicar la naturaleza de la materia oscura.

En julio de 2012 la física copó los titulares: una nueva partícula elemental, el bosón de Higgs, había aparecido en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. La emoción resultaba comprensible. Buscado desde hacía décadas, se trataba del último ingrediente del modelo estándar, la teoría que describe los constituyentes básicos de la materia, sus interacciones y, con ello, «lo que en lo más íntimo mantiene unido el universo», como lo habría formulado Goethe.

Joerg Jaeckel pertenece al Instituto de Física Teórica de la Universidad de Heidelberg. Sus investigaciones se centran en las extensiones del modelo estándar, las partículas de tipo axión y la física del LHC.

Axel Lindner es físico experimental del Sincrotrón Alemán de Electrones (DESY), en Hamburgo, y el portavoz del proyecto ALPS de búsqueda de partículas ultraligeras.

Andreas Ringwald trabaja también en DESY, donde puso en marcha el proyecto ALPS. Investiga los aspectos teóricos de las partículas similares al axión y su posible detección experimental.

Pero, además, el hallazgo demostró que los físicos habían apostado por la estrategia correcta: construir un enorme acelerador capaz de alcanzar energías muy elevadas para, de esta manera, producir y detectar partículas de gran masa. No en vano, los expertos ya han comenzado a considerar la construcción de máquinas aún mayores en el futuro.

Ese éxito parece haber oscurecido el hecho de que el LHC aún no ha satisfecho otra de sus expectativas: encontrar las partículas constituyentes de la materia oscura. Eso podría suceder este mismo año, cuando el LHC reanude las colisiones y duplique la energía que bastó para descubrir el bosón de Higgs. Sin embargo, algunos avances teóricos y experimentales sugieren que la búsqueda de este componente fundamental del universo tal vez debería orientarse al revés: no hacia la exploración de partículas muy masivas, sino extremadamente ligeras.

La enorme precisión con que el modelo estándar describe el comportamiento microscópico de la materia era ya evidente mucho antes del hallazgo del bosón de Higgs. Hasta la fecha, ningún experimento ha mostrado desviaciones significativas con respecto a sus predicciones. En este sentido, el bosón de Higgs no ha hecho sino confirmar de manera espectacular los fundamentos de este marco teórico. Pero, a pesar de todo, los investigadores siguen empeñados en buscar física más allá del modelo estándar. ¿Por qué?

Una razón se debe a que, en los últimos decenios, los astrónomos han descubierto que las partículas elementales conocidas solo dan cuenta del 15 por ciento de toda la materia existente en el universo. El 85 por ciento restante se compone de materia «oscura»: una misteriosa sustancia que creemos formada por partículas hasta ahora desconocidas y de las que solo sabemos que interaccionan muy poco con la luz y con el resto de las partículas del modelo estándar. A pesar de esa aparente inactividad, resulta muy difícil imaginar cómo sería el universo sin ellas. Debido a la atracción gravitatoria, la materia oscura se agrega en gigantescas nubes en cuyo centro se forman las galaxias, como la Vía Láctea.

¿PARTÍCULAS ULTRALIGERAS?

En los últimos dos decenios, las investigaciones sobre materia oscura se han centrado en buscar partículas de gran masa. En parte, ello se ha debido a los avances teóricos en supersimetría, una extensión del modelo estándar que predice toda una legión de partículas de masa muy elevada. Por otro lado, hacia el año 2000 se iniciaron los trabajos de construcción del LHC. Su energía de operación se adentraría en la escala del teraelectronvoltio (TeV), lo que brindaba la posibilidad de producir y detectar tales partículas. Numerosos investigadores mostraron un interés especial por las denominadas WIMP, siglas de *weakly interacting massive particles*, o «partículas masivas que interaccionan débilmente». El término *wimp*, que en inglés significa «pelele» o «debilucho», alude también a su escasa interacción con las partículas conocidas [*véase* «Mundos oscuros», por Jonathan Feng y Mark Trodden; Investigación y Ciencia, enero de 2011]. Hoy por hoy, las WIMP son aún consideradas las principales candidatas a componer la materia oscura. Sin embargo, se niegan a aparecer en los experimentos. Hasta el momento no ha sido posible detectarlas ni siquiera en el anillo de 27 kilómetros del LHC —aunque, por supuesto, es posible que solo empiecen a manifestarse a energías aún mayores.

Además de los aceleradores de partículas, otros experimentos complementarios intentan cazar WIMP procedentes del espacio. A tal fin se han construido grandes detectores subterráneos, como LUX, en Dakota del Sur, XENON y DAMA, en el laboratorio italiano de Gran Sasso, o CoGeNT, en Minnesota. Hasta ahora, sin embargo, ninguno de ellos ha aportado pruebas concluyentes. Aunque en ciertos casos se han registrado señales alentadoras, estas se han mostrado incompatibles con los resultados de otros experimentos, por lo que reconciliar todos los indicios requeriría postular nuevas partículas o interacciones aún más complejas [*véase* «El estado actual de la búsqueda de materia oscura», por Alejandro Ibarra; Investigación y Ciencia, junio de 2014].

Ante tales dificultades, tal vez haya llegado el momento de considerar la posibilidad de que la materia oscura se componga de partículas ultraligeras. Son varias las razones teóricas que, desde hace años, vienen sugiriendo la existencia de este tipo de partículas. Y aunque se espera que interaccionen muy poco con la materia ordinaria —menos aún que las WIMP—, ya se han diseñado varios experimentos que, tal vez, podrán detectarlas.

En jerga técnica, estos pesos ligeros reciben el nombre genérico de WISP, por *weakly interacting slim particles*, «partículas ligeras que interaccionan débilmente». Las siglas remiten también a la voz inglesa *wispy*, que puede traducirse como «delgado» o «menudo». Recuerdan en cierto modo a los neutrinos, los cuales también fueron considerados durante

largo tiempo como posibles candidatos a componer la materia oscura. Sin embargo, hoy sabemos que los neutrinos se generan en procesos muy energéticos, por lo que se mueven demasiado deprisa para formar estructuras «frías» y contribuir a la formación de las galaxias. Las WISP, en cambio, se desplazarían muy despacio, por lo que sí podrían engendrar las «semillas gravitatorias» necesarias para aglomerar grandes cantidades de masa.

Para diseñar experimentos capaces de buscar WISP, hemos de concretar tanto como podamos la clase de nuevos fenómenos físicos que esperamos observar. La WISP mejor entendida probablemente sea el axión, propuesto en los años setenta y buscado desde hace más de dos décadas. Para describir sus propiedades y las razones que llevaron a postularlo, hemos primero de retroceder un poco.

Los físicos adoran las simetrías. Prácticamente toda la física moderna se basa en simetrías a partir de las cuales pueden deducirse leyes y principios de conservación. Un ejemplo conocido lo hallamos en el principio de conservación de la energía. Este aparece como consecuencia de un hecho empírico que, desde un punto de vista matemático, puede describirse como una simetría: que las leyes físicas no dependen del tiempo. Si realizamos un experimento hoy y lo repetimos mañana, las leyes que lo rigen y los resultados que obtendremos serán idénticos. Esta relación entre simetrías y leyes de conservación constituye una de las piedras angulares de la física moderna. Fue establecida hace ahora cien años por la física y matemática alemana Emmy Noether [*véase* «Emmy Noether»; Investigación y Ciencia, diciembre de 2004].

El axión se encuentra vinculado a otra simetría relacionada con el tiempo, la simetría por inversión temporal. Esta puede entenderse del siguiente modo: si filmamos un proceso físico que sea simétrico con respecto a la inversión temporal, la secuencia que resultará al pasar la película hacia atrás también corresponderá a un proceso físico posible. En otras palabras, si alguien solo ve la grabación en uno u otro sentido, no podrá decir qué proceso tuvo realmente lugar. A modo de ejemplo, podemos pensar en dos personas que se lanzan una pelota. Si vemos la grabación, no podremos saber si la película procede hacia delante o hacia atrás. En general, los procesos macroscópicos no respetan la simetría por inversión temporal, ya que una parte de la energía siempre se disipa en forma de calor, por lo que deja de contribuir al movimiento. Así, una pelota de goma que rebota en el suelo alcanzará una altura cada vez menor, por lo que sí podremos deducir el sentido de la evolución temporal.

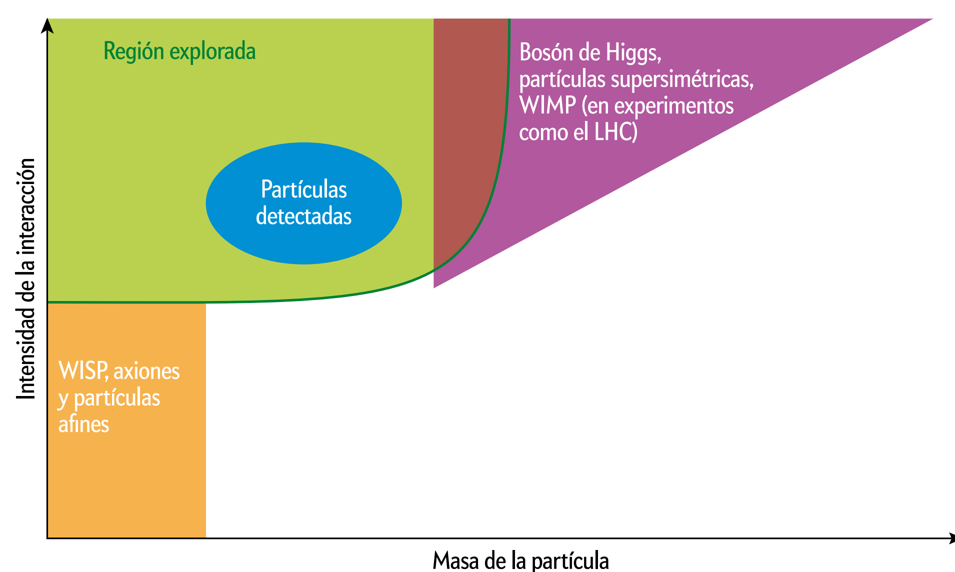
SIMETRÍAS E INTERACCIONES FUERTES

La simetría por inversión temporal desempeña un papel muy relevante en el modelo estándar. De las tres interacciones elementales que este describe, hay una, la electromagnética, que no viola dicha simetría. Sin embargo, tanto la interacción nuclear débil como la fuerte quedan especificadas por una serie de parámetros que, al menos en principio, dejan la puerta abierta a que dicha simetría se viole. Que eso ocurra o no dependerá del valor exacto que tomen dichos parámetros. Si valen cero, la interacción correspondiente respetará la simetría por inversión temporal; en caso contrario, la romperá.

Lo más sorprendente es que solo la interacción nuclear débil parece aprovechar esa oportunidad para violar la simetría por inversión temporal. La interacción fuerte no lo hace, al menos hasta donde nos permite concluir la precisión experimental alcanzable hoy en día. Sin embargo, los quarks experimentan ambas interacciones, por lo que cabría esperar que la ruptura de simetría por inversión temporal se «contagiase» a la interacción fuerte. ¿Por qué eso no ocurre?

La respuesta más elegante hasta la fecha la proporcionaron en 1977 Roberto Peccei y Helen Quinn, por entonces ambos en Stanford. Estos investigadores se preguntaron qué ocurriría con la energía del vacío si, en lo tocante a las interacciones fuertes, el parámetro mencionado más arriba no fuese constante, sino dinámico. La respuesta resultó sorprendente. Si dicho parámetro pudiese variar, al cabo de un tiempo alcanzaría de manera espontánea el valor energéticamente más favorable. Y, cuando eso ocurriese, la simetría por inversión temporal de la interacción nuclear fuerte quedaría automáticamente asegurada.

Un año después, Steven Weinberg y Frank Wilczek, hoy ambos galardonados con el premio Nobel de física, observaron que el mecanismo propuesto por Peccei y Quinn encerraba una interesante consecuencia. Desde el punto de vista matemático, un parámetro dinámico no es más que un campo. Y las excitaciones fundamentales de un campo pueden interpretarse física-



TERRITORIO DESCONOCIDO: Las partículas elementales pueden agruparse atendiendo a su masa y a la intensidad con que interaccionan con el resto. El régimen de masas pequeñas e interacciones intensas (*verde* y *azul*) ha sido explorado ya. El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN y otros experimentos de alta energía buscan partículas muy masivas (*violeta*). Entre ellas destacan las WIMP, postuladas hace tiempo como posibles candidatas a componer la materia oscura. Sin embargo, cada vez más experimentos intentan detectar WISP, partículas ultraligeras similares al axión (*naranja*). Al igual que las WIMP, algunas de ellas también podrían explicar la materia oscura.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN J. JAECKEL, A. LINDNER Y A. RINGWALD

mente como partículas; los fotones, por ejemplo, corresponden a las excitaciones del campo electromagnético. A partir de tales consideraciones, Weinberg y Wilczek demostraron que el mecanismo de Peccei y Quinn implicaba la existencia de una nueva partícula: el axión. De manera un tanto caprichosa, Wilczek la bautizó con el nombre de un detergente estadounidense, ya que «limpiaría» la interacción nuclear fuerte de la violación de la simetría por inversión temporal.

Las propiedades del axión pueden calcularse casi por completo a partir de la teoría. La única excepción es su escala fundamental de energía. Por un lado, esta se encuentra relacionada con la escala típica de energías y masas del resto de las partículas; solo la masa del axión resultaría muy inferior al resto. Por otro, la escala del axión determina también su grado de interacción con las demás partículas. En general, estas magnitudes se hallan en relación inversa: cuanto mayor sea la escala energética del axión, menor será su masa y más débiles sus interacciones.

A partir de experimentos de laboratorio y observaciones astronómicas, pronto quedó claro que la escala del axión debía superar el millón de TeV: una energía 100.000 veces mayor que la que alcanzará el LHC. Y, aunque los detalles concretos dependen del modelo, ello implica que su masa debería situarse entre la centésima y la millonésima de electronvoltio. El electrón, una de las partículas más ligeras que se conocen, tiene una masa muchísimo mayor, de unos 500.000 electronvoltios. En caso de existir, el axión debería ser ultraligero: un ejemplo excelente de WISP.

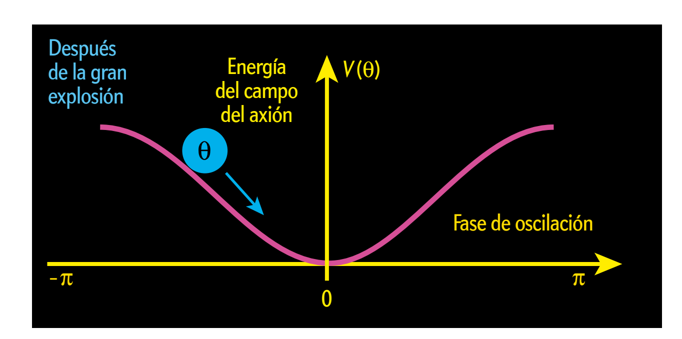
A la hora de considerar la escala de energía típica de una partícula o de un modelo teórico, los físicos suelen atribuirle un significado que va más allá del modelo en sí. En general, resulta más sencillo encajar en un mismo marco teórico dos modelos cuyas escalas de energía se parecen. Por el contrario, los modelos que incluyen escalas con órdenes de magnitud muy dispares tienden a excluirse uno a otro.

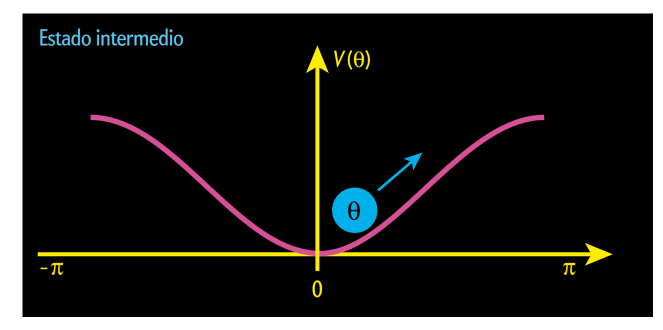
AXIONES Y NUEVA FÍSICA

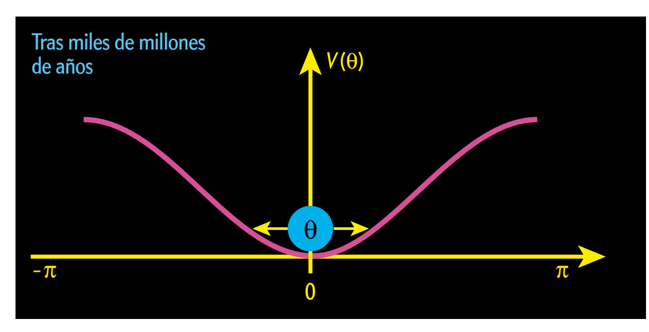
Tales argumentos, aplicables a la escala energética del axión, pueden también llevar a preguntarnos por qué la masa de los neutrinos es en torno a un millón de veces menor que la del electrón. Algunas de las posibles respuestas sugieren introducir una escala de energía adicional, la cual resulta ser del mismo orden de magnitud que la del axión. Estos modelos predicen la existencia de nuevas partículas masivas asociadas a los neutrinos que, a su vez, podrían ayudar a resolver otro de los mayores misterios de la física moderna: ¿por qué el universo se encuentra formado casi exclusivamente por materia, sin apenas nada de antimateria? En caso de existir las compañeras masivas del neutrino, poco después de la gran explosión se habrían desintegrado en partículas tanto de materia como de antimateria. Sin embargo, ambos procesos habrían ocurrido con probabilidades ligeramente distintas, lo que permitiría explicar la actual asimetría entre materia y antimateria.

Por otro lado, cabe preguntarse si realmente basta con una pequeña extensión del modelo estándar para integrar el axión. En este sentido, ¿se funda la teoría sobre los cimientos correctos? El modelo estándar sufre algunas dificultades conceptuales para las que, hasta la fecha, no se ha encontrado ninguna explicación. ¿Por qué hay cuatro interacciones fundamentales, y no más ni menos? ¿Por qué las partículas del modelo estándar abarcan masas tan dispares? La del neutrino, por ejemplo, resulta unos once órdenes de magnitud menor que la del bosón de Higgs. ¿Y por qué el modelo estándar incluye tantos parámetros cuyo valor no parece poder derivarse de primeros principios?

Para hallar las respuestas, hace tiempo que los físicos buscan una teoría que describa de manera unificada todas las interacciones, incluida la gravedad. Ya existen algunas candidatas, como la teoría de cuerdas, la gravedad cuántica de bucles o las teorías con puntos fijos no triviales del grupo de renormalización. No obstante, todas ellas adolecen de sus propios problemas. En particular, muestran grandes dificultades a la hora de predecir fenómenos que puedan ponerse a prueba con los experimentos disponibles hoy en día. A diferencia de lo que ocurre en la imaginación de algunos teóricos, cuando necesitamos un acelerador

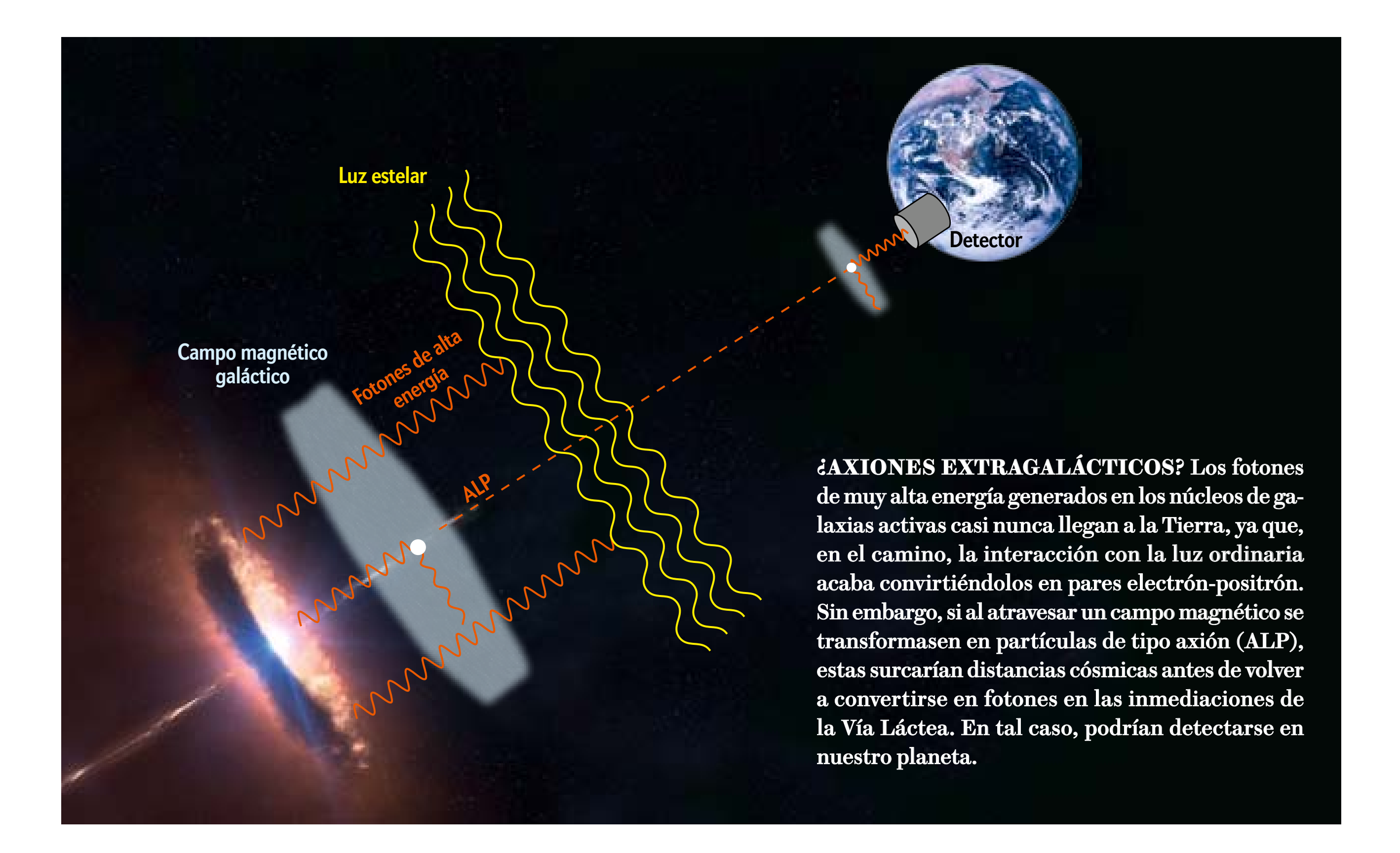






PRODUCCIÓN EN MASA: El axión se encuentra relacionado con la existencia de un nuevo campo descrito por el «parámetro theta» (θ) y sujeto a un potencial como el que indica la figura. Poco después de la gran explosión, dicho campo habría adoptado una configuración de energía muy elevada (*arriba*). A medida que el cosmos se enfriaba, habría descendido hacia el mínimo de energía para, después, continuar ascendiendo por el potencial, como una bola que rodase en un cuenco poco profundo (*centro*). En la actualidad, el campo solo experimentaría pequeñas oscilaciones en torno al mínimo (*abajo*). La energía de estas oscilaciones amortiguadas determina el número de axiones producidos en el universo. En nuestro entorno galáctico, su densidad podría rondar los mil millones por centímetro cúbico.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN J. JAECKEL, A. LINDNER Y A. RINGWALD



¿AXIONES EXTRAGALÁCTICOS? Los fotones de muy alta energía generados en los núcleos de galaxias activas casi nunca llegan a la Tierra, ya que, en el camino, la interacción con la luz ordinaria acaba convirtiéndolos en pares electrón-positrón. Sin embargo, si al atravesar un campo magnético se transformasen en partículas de tipo axión (ALP), estas surcarían distancias cósmicas antes de volver a convertirse en fotones en las inmediaciones de la Vía Láctea. En tal caso, podrían detectarse en nuestro planeta.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, ADAPTADO DE MANUEL MEYER/UNIVERSIDAD DE ESTOCOLMO (*esquema*); LUÍS CALÇADA/ESO (*disco de acreción*); NASA (*Tierra*)

cuyo tamaño no asciende a 30 kilómetros, sino a 30.000 años luz, nos enfrentamos a graves obstáculos.

También en este contexto aparecen las partículas ultraligeras. Varios investigadores, entre quienes se cuentan dos de nosotros (Jaeckel y Ringwald), han demostrado que un gran número de propuestas basadas en la teoría de cuerdas predicen la existencia de axiones y otras partículas ligeras. Algunas guardan ciertas similitudes con el axión, por lo que se las agrupa bajo el nombre genérico de ALP, por *axionlike particles*, o «partículas de tipo axión». Otras, como los «fotones oscuros», se parecen más a las partículas de luz, aunque interaccionarían mucho menos que estas. Por tanto, un éxito en la detección de axiones u otras WISP tal vez aportase el primer indicio experimental de la teoría de cuerdas.

Para poder dar cuenta de la materia oscura, los axiones deberían llenar el universo en enormes proporciones. ¿De dónde surgieron? Consideremos el universo temprano, muy caliente y energético. En aquel momento, el campo asociado al axión habría alcanzado un estado de energía muy elevada, que violaba la simetría por inversión temporal. A medida que el cosmos se enfriaba, dicho campo habría «rodado» hacia su mínimo de energía. Sin embargo, no se habría detenido allí, sino que habría continuado ascendiendo por la curva de potencial, de manera similar a una bola que oscila en un cuenco poco profundo.

Puede demostrarse que la energía almacenada en esas oscilaciones se halla estrechamente relacionada con el número de axiones existentes en el universo. A medida que el cosmos se expandía y las partículas se dispersaban, tales oscilaciones se amortiguaron poco a poco. La teoría permite calcular los detalles del proceso a partir de unos pocos parámetros; entre ellos, la densidad del universo poco después de la gran explosión. Gracias a ello puede comprobarse que, incluso en la actualidad, casi 14.000 millones de años después, la energía de esas oscilaciones debería bastar para que los axiones explicasen, si no toda, sí al menos una gran parte de la materia oscura. La ínfima masa de los axiones se ve así compensada por su gran número: se calcula que, en nuestro entorno galáctico, podría haber más de mil millones de estas partículas por centímetro cúbico.

INDICIOS EXPERIMENTALES

Así pues, vemos que hay buenas razones para postular la existencia de partículas similares al axión. En cuanto a los indicios experimentales, algunas observaciones astrofísicas han arrojado resultados intrigantes; en particular, las relativas a la detección de fotones de muy alta energía procedentes de galaxias distantes. Tras originarse en condiciones extremas, esos fotones deberían acabar produciendo pares electrón-positrón, por lo que no se espera que muchos de ellos alcancen nuestro planeta. En los últimos años, sin embargo, algunas observaciones de fuentes lejanas han detectado más fotones de alta energía de lo que cabría esperar. Las ALP ofrecen una posible explicación. Un aspecto clave de estas partículas reside en que, en presencia de un campo electromagnético, los fotones pueden transformarse en ALP, y viceversa. Por tanto, si los fotones de alta energía se convirtiesen en ALP cerca de la fuente, estos últimos podrían recorrer grandes distancias sin apenas interaccionar con la materia ordinaria. Después, en las inmediaciones de nuestra galaxia, podrían volver a transmutarse en fotones, lo que explicaría por qué somos capaces de detectarlos.

Aunque más especulativa, otra posibilidad guarda relación con los procesos de evolución estelar. Una vez agotado su combustible, las estrellas como el Sol acaban sus días en forma de enanas blancas, cuyo brillo disminuye poco a poco. No obstante, las observaciones indican que estas estrellas parecen

enfriarse más rápido de lo que predicen los modelos astrofísicos. ¿Tal vez algún proceso desconocido extrae energía del interior de la enana blanca? Una vez más, las WISP podrían abandonar el núcleo de la estrella sin dejar rastro, lo que explicaría el fenómeno.

Aún será necesaria una gran cantidad de trabajo teórico y experimental para establecer una conexión firme entre tales observaciones astronómicas y las WISP. Con todo, si estas fuesen las responsables de los efectos mencionados, la intensidad de sus interacciones con la materia ordinaria sería también la «correcta» para explicar la materia oscura.

Por otro lado, detectar WISP en el laboratorio nos obliga a diseñar experimentos capaces de registrar sucesos muy poco frecuentes, ya que tanto la conversión de fotones en WISP como el proceso inverso ocurren con una probabilidad muy baja. A tales características responde el experimento Búsqueda de Cualquier Partícula Ligera (ALPS, Any Light Particle Search), al que pertenecemos dos de nosotros (Lindner y Ringwald). Situado en el Sincrotrón Alemán de Electrones (DESY), en Hamburgo, el proyecto ALPS intenta detectar partículas ultraligeras a partir de una idea que, a primera vista, tal vez parezca un sinsentido: hacer que la luz atraviese una pared totalmente opaca.

Para ello, primero se hace pasar un potente rayo láser a través de un campo magnético. De esta manera, esperamos que alguno de los fotones del láser interaccione con un fotón virtual del campo magnético y se convierta en un axión o partícula similar. Si eso ocurre, la pared ya no podrá detener el axión, por lo que este la atravesará. Tras la barrera se encuentra otro campo magnético cuyo objetivo consiste en desencadenar el proceso inverso: volver a transformar el axión en un fotón, el cual sí podríamos detectar. Sabremos que se trata del fotón «correcto» si tiene la misma energía y polarización que los fotones del láser. Este mismo principio también puede emplearse para buscar otras WISP, como fotones oscuros.

El procedimiento funciona mejor cuanto mayor sea el flujo de fotones. El experimento ALPS-I, hoy por hoy el más sensible de este tipo, puede detectar fotones incluso si solo llega uno cada 100 segundos. Durante ese tiempo, un láser de 1000 vatios emite alrededor de 10^{24} fotones. De modo que, en principio, bastaría con que, por cada billón de fotones, uno se transformase en un axión. De esa manera atravesarían la pared un billón de partículas, una de las cuales se convertiría de nuevo en un fotón. Uno de los componentes clave de ALPS-I es un complejo resonador óptico que refleja la luz láser múltiples veces antes de llegar a la pared. De esta manera, los fotones atraviesan el campo magnético una y otra vez, lo que aumenta la potencia efectiva del láser desde los 4 vatios hasta los 1200.

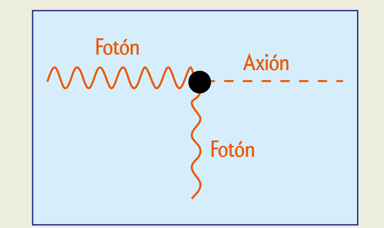
La siguiente fase del experimento, ALPS-II, actualmente en construcción, se adentrará en un régimen mucho más prometedor. Se prevé que cuente con un láser de 150 kilovatios y con 20 imanes, en lugar de uno solo. Además, se empleará un detector de fotones superconductor aún más sensible. Por último, también dispondrá de un espejo resonador tras la pared. Su sensibilidad le permitirá detectar partículas ultraligeras que interaccionen con la luz incluso mil veces menos que las que busca ALPS-I. Las primeras pruebas están previstas para este año y esperamos que el experimento esté operativo para 2018. En

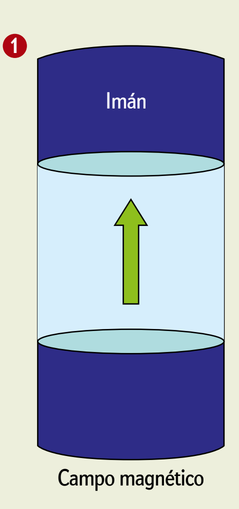
TÉCNICAS DE BÚSQUEDA

Transformación sutil

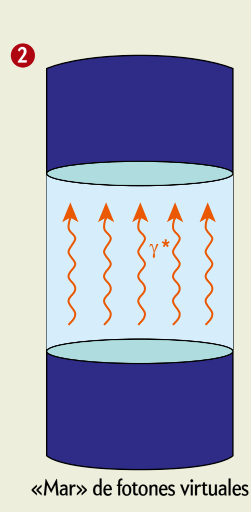
Los modelos teóricos predicen que las partículas similares al axión, conocidas con el nombre genérico de ALP, pueden desintegrarse en dos fotones, y viceversa (*inserto*). Este proceso brinda la posibilidad de detectar ALP en el laboratorio.

En un experimento típico se genera un campo magnético muy intenso ❶, el cual puede entenderse como formado por un «mar» de fotones virtuales (γ*) de longitud de onda larga ❷. Después, un láser dispara fotones de longitud de onda menor (γ) sobre el campo magnético, gracias a lo cual podrían crearse axiones ❸. El mismo proceso puede tener lugar en sentido inverso, lo que correspondería a la desintegración de un axión.

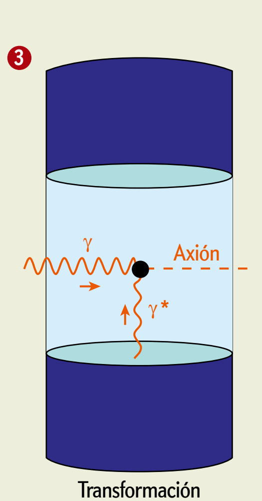


❶


Campo magnético

❷


«Mar» de fotones virtuales

❸


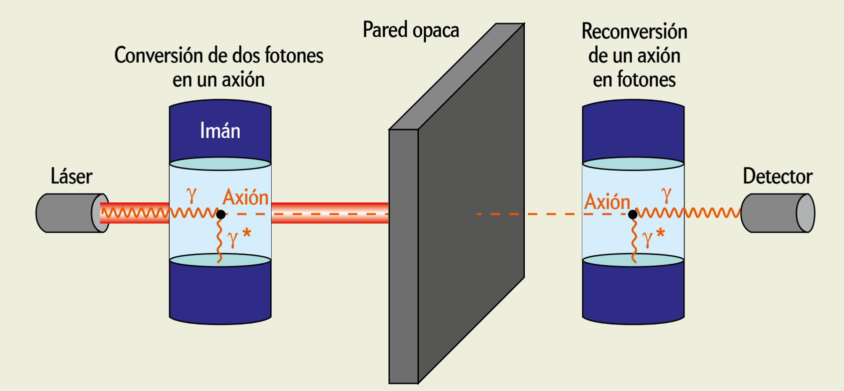
Transformación de dos fotones en un axión

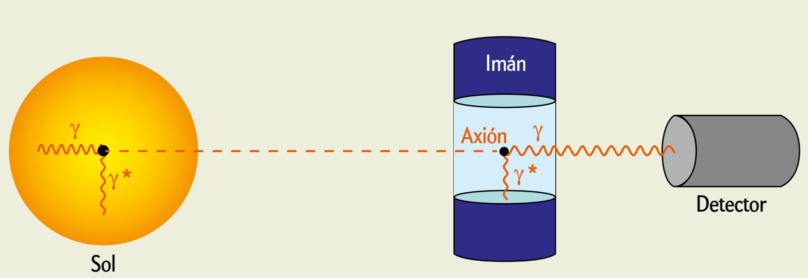
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN LA COLABORACIÓN ADMX/UNIVERSIDAD DE WASHINGTON

Axiones en el laboratorio

La interacción entre axiones y fotones puede aprovecharse para intentar crear estas partículas en el laboratorio o, alternativamente, para detectar las que pudiesen producirse en el Sol. En Europa, dos experimentos persiguen dichos objetivos (*abajo*).

Luz a través de la pared: En el experimento ALPS, en Hamburgo, un láser de gran potencia incide sobre una pared completamente opaca. Antes de llegar a esta, la luz cruza un campo magnético. Si uno de los fotones del láser (γ) y un fotón virtual del campo magnético (γ*) generasen un axión, este podría atravesar la pared y, en el lado opuesto, volver a convertirse en un fotón por medio del proceso inverso.





Helioscopio: La gran cantidad de fotones y los intensos campos electromagnéticos existentes en el interior del Sol proporcionan unas condiciones ideales para favorecer la producción de axiones. El Telescopio Solar de Axiones del CERN (CAST) intenta detectarlos a su llegada a la Tierra tratando de inducir su reconversión en partículas de luz por medio de un intenso campo magnético.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN LA COLABORACIÓN ADMX/UNIVERSIDAD DE WASHINGTON

particular, tal vez ALPS-II permita poner a prueba la posibilidad de que los axiones expliquen las observaciones astronómicas de fotones de alta energía. Si dicha hipótesis es correcta, las mismas partículas deberían poder detectarse en ALPS-II.

¿AXIONES EN EL SOL?

Los experimentos en los que puede prescindirse del primer paso (la infrecuente conversión de fotones en WISP) gozan de una sensibilidad aún mayor. Por esa razón, otra estrategia consiste en emplear «helioscopios» para buscar WISP procedentes del Sol, en cuyo interior se dan condiciones ideales para producir estas partículas: enormes cantidades de fotones en presencia de intensos campos electromagnéticos. En principio, las WISP llegarían sin impedimentos desde el núcleo de la estrella hasta el laboratorio, donde bastaría con conseguir que se reconvirtiesen en fotones. En la actualidad, el mejor instrumento de estas características es el Telescopio Solar de Axiones del CERN (CAST). Para 2020 se ha propuesto que entre en funcionamiento el Observatorio Internacional de Axiones (IAXO), en el mismo laboratorio.

Los axiones también podrían llegar en gran número desde el espacio, al menos si realmente componen la materia oscura. En estos momentos, el detector más avanzado para buscar axiones procedentes el espacio es el Experimento sobre Materia Oscura Axiónica (ADMX), en la Universidad de Washington. En Europa, cabe preguntarse si, gracias a su versátil tecnología de campos magnéticos, IAXO resultará apropiado para este tipo de mediciones o si, por el contrario, deberán considerarse otros planteamientos.

Aunque la mayoría de los investigadores aún cree que la materia oscura probablemente esté compuesta por partículas de gran masa, hemos visto que hay también excelentes razones para considerar el extremo opuesto de la balanza. Ante la falta de éxito en otros frentes, la búsqueda de partículas ultraligeras se antoja hoy aún más atractiva. Sobre todo, si tenemos en cuenta que las posibilidades experimentales han mejorado de manera considerable durante los últimos años y que lo seguirán haciendo en el futuro próximo. Por último, no hemos de olvidar que incluso los grandes experimentos de este tipo, como ADMX o ALPS II, pueden llevarse a término con pocos millones de euros. Tal vez sus frutos estén al alcance de la mano.

PARA SABER MÁS

The low-energy frontier of particle physics. J. Jaeckel y A. Ringwald en *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 60, págs. 405-437, julio de 2010. Disponible en **arxiv.org/abs/1002.0329**

Light shining through walls. J. Redondo y A. Ringwald en *Contemporary Physics*, vol. 52, n.º 3, págs. 211-236, abril de 2011. Disponible en **www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00107514.2011.563516#tabModule**

The quest for axions and other new light particles. K. Baker et al. en *Annalen der Physik*, vol. 525, n.º 6, págs. A93-A99, junio de 2013. Disponible en **onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.201300727/full**

Any Light Particle Search II: Technical design report. R. Bähre et al. en *Journal of Instrumentation*, vol. 8, pág. T09001, septiembre de 2013. Disponible en **arxiv.org/abs/1302.5647**

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Trenes flotantes

¿Se basará el transporte ferroviario del futuro en la levitación magnética lograda con electroimanes superconductores?

En 2011, con ocasión del centenario del descubrimiento de la superconductividad, nos maravillamos con trenes en miniatura y monopatines que flotaban sobre raíles magnéticos. ¿Anticipan tales prototipos los transportes del futuro? Compañías como la suiza Swissmetro o el consorcio internacional ET3 nos han prometido seguridad, rapidez y frugalidad energética gracias a trenes de sustentación magnética que avanzan en el vacío. La técnica se aplica ya en la línea comercial Transrapid de Shanghái y en los prototipos MLX de los maglev japoneses, poseedores del récord mundial de velocidad sobre raíl: 581 kilómetros por hora en 2003.

¿Levitación estable?

Pero ¿cómo conseguir que un tren entero levite y permanezca estable? En principio, un imán levitará si lo acercamos a otro. Uno de neodimio de pocos gramos, por ejemplo, genera una fuerza de atracción de varios newtons entre polos opuestos o de repulsión entre polos iguales [*véase* «Levitación magnética», por Marc Boada; Investigación y Ciencia, febrero de 2006]. Sin embargo, pronto descubriremos que el imán que debía flotar girará nada más soltarlo y se adherirá al que debía repelerlo. Con independencia de la configuración elegida, la levitación con imanes permanentes (o electroimanes) es siempre inestable.

En cambio, la levitación de un imán sobre una plaqueta superconductora permanece estable. ¿Por qué? Todo material superconductor impide que un campo magnético penetre en él. Al acercar un imán, en su superficie se genera una corriente eléctrica que induce un campo magnético que contrarresta el campo exterior, de modo que anula el campo magnético resultante en el interior. Por tanto, dichas corrientes actúan como un electroimán cuya polaridad coincide con la imagen especular de la del imán inicial, por lo que este será repelido siempre, con independencia de su orientación. Por desgracia, dado que la superconductividad a temperatura ambiente sigue siendo una quimera, no parece fácil construir una instalación de varios kilómetros de raíles superconductores.

No obstante, la materia en estado normal también presenta este tipo de repulsión, llamada diamagnética. Así ocurre por ejemplo con el agua: al acercar un imán, su campo magnético inducirá una corriente eléctrica en las nubes electrónicas moleculares, la cual generará un campo magnético opuesto al del imán. Y si este último es muy intenso, incluso el agua se imantará lo suficiente para levitar. Así fue como, en 1992, el hoy premio nóbel André Geim, descubridor del grafeno, hizo levitar agua, un pequeño tomate y hasta una rana viva en un campo magnético de 16 teslas.



LA LEVITACIÓN de un imán sobre un material superconductor es estable. Al contrario de lo que ocurre cuando acercamos dos imanes ordinarios, las corrientes inducidas en el interior del superconductor crean un campo magnético opuesto al del imán que levita, con independencia de su orientación. Este fenómeno se debe al diamagnetismo característico de los superconductores: sometidos a un campo magnético externo, estos materiales impiden que las líneas de campo penetren en su interior.

Semejante intensidad resulta desmesurada para aplicaciones a gran escala. Pero no todo está perdido. Un metal corriente, como el cobre, puede también repeler imanes. Para ello basta con que el metal y el imán se pongan en movimiento uno con respecto al otro. Cuando un imán se desplaza paralelamente a la superficie de un conductor, la variación en el tiempo del campo magnético en cada punto del conductor induce una corriente eléctrica, conocida como «corriente de Foucault», la cual genera un campo magnético que reacciona sobre el imán.

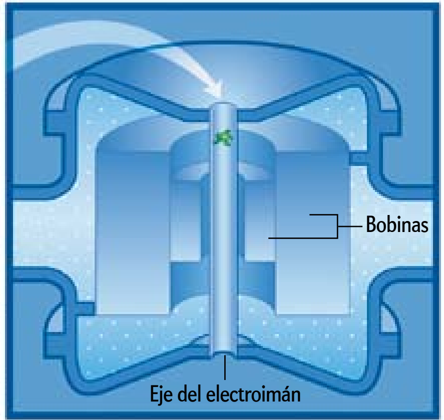
Debido a la ley de Lenz, la acción de las corrientes de Foucault se opondrá a la causa que las produjo. El primer efecto es, por tanto, una fuerza de resistencia contraria al movimiento; de ella ya sacan buen provecho los frenos de inducción que equipan a camiones y trenes de alta velocidad. El segundo, menos conocido, consiste en la aparición de una fuerza de sustentación que repele el imán: dado que el campo magnético generado por este disminuye con la distancia —y, con él, las corrientes inducidas—, la ley de Lenz favorece la separación entre los objetos. En concreto, la sustentación crece con la velocidad hasta alcanzar un máximo, mientras que la resistencia pasa por un máximo y luego comienza a disminuir con mayor rapidez.

Corrientes inducidas

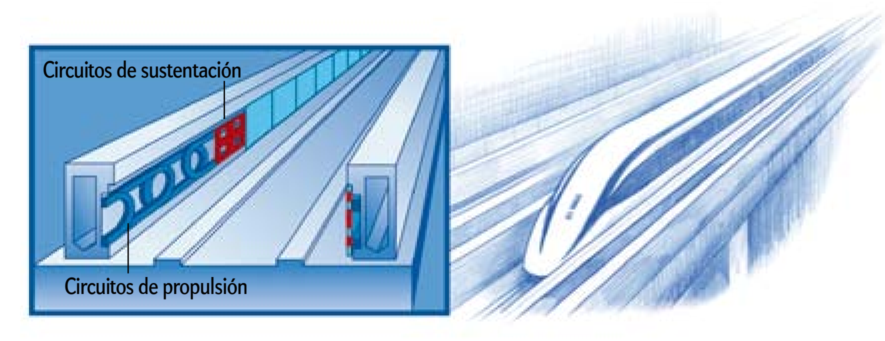
En 1966, los investigadores James Powell y Gordon Danby, del Laboratorio Nacional de Brookhaven, en EE.UU., propusieron emplear dicho mecanismo para sustentar un tren. Sobre ese principio, contribuyeron a desarrollar el maglev japonés. En él, la fuerza de sustentación solo alcanza un valor suficiente cuando la velocidad del tren rebasa cierto umbral, que en el caso de los MLX asciende a unos 100 kilómetros por hora. Por esa razón, el tren se halla provisto de ruedas para el arranque y la parada. En fase de levitación, la

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON DE BRUNO VACARO





UN CAMPO MAGNÉTICO intenso y no homogéneo puede hacer que un objeto ordinario levite de forma estable. En cada punto del objeto, el campo induce minúsculos bucles de corriente en las nubes electrónicas moleculares. El campo magnético generado por tales corrientes se opone a la causa que lo produce, por lo que el objeto se ve repelido hacia aquellas zonas donde el campo es más débil.



EL TREN EXPERIMENTAL japonés maglev posee un sistema de sustentación magnética compuesto de circuitos en forma de ocho (*rojo*) dispuestos en los costados de los raíles y que funcionan gracias a los electroimanes superconductores instalados en el tren. Si este se desvía vertical o lateralmente con respecto a los raíles, el campo magnético de los electroimanes inducirá una corriente en los bucles, la cual generará un campo magnético que rectificará la posición del tren. También la propulsión se consigue mediante campos magnéticos, gracias a un juego de bobinas a bordo y otro (*azul*) a lo largo de los raíles.

estabilidad del tren queda asegurada: si el vehículo se acerca al suelo, la fuerza de sustentación, repulsiva, aumenta e impide el contacto.

En cambio, la fuerza de resistencia plantea un serio problema. Este habría sido insalvable si Powell y Danby no hubieran tenido la idea de emplear en los raíles no un conductor macizo, sino bobinas en forma de ocho conectadas entre sí y dispuestas a ambos lados. Los dos bucles que componen cada ocho se orientan en sentidos contrarios; de esta manera, cuando el imán que se encuentra enfrente está centrado, los flujos magnéticos que atraviesan los bucles se contrarrestan. Ello elimina las corrientes inducidas y, de esta manera, la disipación de energía.

Pero en esa situación tampoco hay sustentación. Por tanto, por efecto de su propio peso, el tren descenderá ligeramente y se situará por debajo del plano de simetría. Ello induce una corriente en el circuito, la cual genera una sustentación proporcional al descenso. Al mismo tiempo, la resistencia magnética crece como su cuadrado, por lo que, para pequeñas desviaciones, resulta unas cien veces inferior a la sustentación y es, además, un orden de magnitud menor que la resistencia aerodinámica.

El MLX funciona con raíles similares. A gran velocidad, flota a varios centímetros del suelo, una separación suficiente para evitar incidentes. Además, si el tren se acerca demasiado a uno de los raíles y se aleja del otro (por ejemplo, a causa del viento), aparece una fuerza lateral que lo devuelve a la posición correcta.

La otra gran idea de Powell y Danby fue sugerir el empleo de electroimanes superconductores a bordo de los trenes. Muy potentes y capaces de crear la sustentación necesaria, presentan además una resistencia eléctrica nula y, por tanto, un consumo eléctrico nulo, incluso cuando circulan por ellos centenares de kiloamperios. Como contrapartida, debe alimentarse el sistema criogénico que mantiene la aleación de neodimio y titanio a la temperatura del helio líquido (4,2 grados Kelvin, o 269 grados Celsius bajo cero). Así pues, resulta comprensible el interés que reviste el desarrollo de materiales en los que la superconductividad se alcanza a temperaturas más razonables (superiores a 77 kelvin, la temperatura del nitrógeno líquido).

Además, el magnetismo facilita también la propulsión. Esto se consigue gracias a un motor que acciona unas bobinas a bordo alimentadas por corriente alterna, así como a un segundo juego de bobinas instaladas a lo largo del raíl.

Como el lector podrá imaginar, el diseño de los raíles sigue siendo complicado, y las infraestructuras, costosas. Pero ello no ha impedido que algunos ingenieros sueñen ya con la siguiente generación. Dado que el principal obstáculo lo plantea la resistencia aerodinámica, se ha propuesto suprimirla haciendo circular los trenes por tubos de vacío. Esta es la razón por la que los proyectos de Swissmetro y, más recientemente, de ET3 prometen aumentar la velocidad en un orden de magnitud para el mismo consumo energético. ¿Viajaremos pronto en trenes que se desplacen a 5000 kilómetros por hora?

PARA SABER MÁS

Maglev: The new mode of transport for the 21st century. J. Powell y G. Danby en *21st Century Science and Technology*, vol. 16, n.º 2, págs. 43-57, 2003. Disponible en **www.21stcenturysciencetech.com/articles/Summer03/maglev2.html**

Evacuated tube transport technologies (ET3): A maximum value global trasportation network for passangers and cargo. D. Oster et al. en *Journal of Modern Transportation*, vol. 19, n.º 1, págs. 42-50, 2011. Disponible en **link.springer.com/article/10.1007%2FBF03325739**

EN NUESTRO ARCHIVO

Un nuevo maglev. Richard F. Post en *IyC*, marzo de 2000.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

Matemáticas *steampunk*

El analizador armónico de Michelson

El *steampunk*, que nació en los años ochenta como subgénero literario del *cyberpunk*, representa hoy un movimiento retrofuturista en pleno auge. Es retro porque se inspira en la era victoriana y en la Revolución Industrial, con el espíritu de aventura y descubrimiento típicos de la época. Y es futurista porque imagina realidades alternativas en las que la evolución de las máquinas de vapor alcanza niveles de ciencia ficción. Ironías de la historia, aquellos ingenios que resultaban satánicos para los románticos rezuman romanticismo en el siglo XXI.

H. G. Wells (1866-1946) y Julio Verne (1828-1905), considerados los padres de la ciencia ficción moderna, han sido también la inspiración más directa de este movimiento. Su estética bebe del imaginario creado por estos grandes de la literatura, como las naves alienígenas de *La guerra de los mundos*, la máquina del tiempo de la obra homónima de Wells, el cohete de *De la Tierra a la Luna* o el *Nautilu*s de *Veinte mil leguas de viaje submarino*.

El género permea hoy todos los ámbitos culturales, desde la moda y la bisutería hasta la escultura y la arquitectura, pasando por los videojuegos, la música, el cómic, la literatura o el cine. Si desean explorar algunas obras emblemáticas, les recomiendo que echen una ojeada a las esculturas de Sean Orlando, como *Raygun gothic rocketship* o *Steampunk tree house*; a la serie de ilustraciones *Les mondes inventés*, de Stéphan Muntaner; a la instalación *Forevertron Park*, de Tom Every, o a algunas esculturas de Kris Kuksi, como *Church tank*. Especialmente fascinantes me parecen las creaciones mecanoorgánicas de Vladimir Gvozdev, como su famoso *Mecha-rhino*, y las propuestas retroinformáticas, como el *Victorian all-in-one PC*, de Jake von Slatt, o el *Steampunk laptop*, de Datamancer: ordenadores personalizados con maderas nobles, latón, acero y teclas de antiguas máquinas de escribir, que encarnan una especie de oxímoron tecnológico.

La novela *steampunk La máquina diferencial*, de William Gibson y Bruce Sterling, contempla un futuro en el que la informática ha evolucionado a partir de la propuesta del matemático y pionero de las ciencias de la computación Charles Babbage (1791-1871). La máquina diferencial que da título a la obra hace referencia a la máquina analítica de Babbage, proyecto en el que el investigador se embarcó en 1816 y que le acompañaría hasta su muerte. Se trataba de un ingenio de cómputo de propósito general basado en ruedas dentadas y tarjetas perforadas: una computadora mecánica, un ordenador *steampunk*.



COMPUTACIÓN ROMÁNTICA: ***Steampunk desktop*, de Jake von Slatt.**

Por desgracia, Babbage se adelantó un siglo a su tiempo, por lo que su proyecto nunca vio la luz. En homenaje a su genio pionero, en 1991 la máquina diferencial fue construida a partir de los planos originales y, desde entonces, podemos disfrutarla en el Museo de Ciencias de Londres. En la novela de Gibson y Sterling, la máquina acaba fabricándose en serie y convirtiéndose en el inicio de una revolución tecnológica alternativa, en la que ni la válvula de vacío ni el transistor hacen aparición. Como consecuencia, los derroteros tecnológicos de la humanidad, y por tanto su propia historia, serán muy diferentes de los que conocemos.

Analizadores armónicos

Buena parte los implicados en el movimiento *steampunk* son científicos e ingenieros interesados en recrear la historia de la ciencia para aprender de ella. Hace poco, esta arqueología experimental de técnicas obsoletas fue noticia gracias al trabajo de Bill Hammack, Steve Kranz y Bruce Carpenter, quienes rescataron un olvidado analizador armónico del departamento de matemáticas de la Universidad de Illinois.

El análisis armónico, o de Fourier, constituye una herramienta clave en todo tipo de problemas científicos y de ingeniería, como el procesamiento de señales o la determinación de la estructura de un cristal de proteína. No resultaría exagerado afirmar que en el análisis de Fourier se halla una de las piedras angulares de la revolución digital.

Las series de Fourier permiten reescribir una función cualquiera en forma de una suma finita o infinita de funciones sinusoidales simples, denominadas armónicos. Por ejemplo, una onda cuadrada (dada por $f(x) = -1$ si x está entre -1 y 0, y $f(x) = 1$ si x está entre 0 y 1) puede escribirse como:

$$f(x) = \frac{4}{\pi}\,\mathrm{sen}\,(\pi x) + \frac{4}{3\pi}\,\mathrm{sen}\,(3\pi x) + \frac{4}{5\pi}\,\mathrm{sen}\,(5\pi x) + \cdots$$

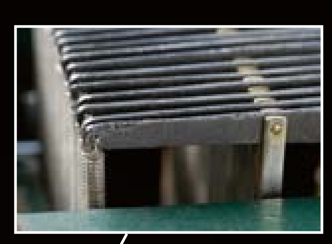
Esta serie contiene infinitos términos, por lo que, si la truncamos, nos estaremos quedando con una aproximación a $f(x)$. Cuantos más armónicos incluyamos, más se acercará la suma a la función original. Y así parece reflejarlo la figura adjunta, que muestra cuatro aproximaciones a la onda cuadrada con uno, tres, trece y cincuenta armónicos, respectivamente.

Hammack y sus colaboradores restauraron un analizador armónico diseñado

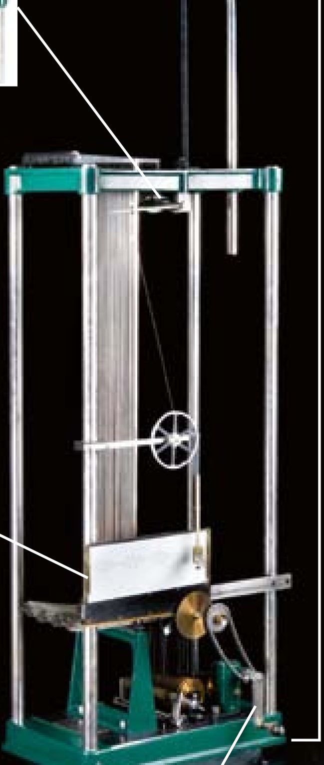
En 1897, Albert Michelson diseñó un dispositivo puramente mecánico para representar gráficamente series de Fourier. Su invento permitiría sacar a la luz lo que más tarde daría en llamarse «fenómeno de Gibbs», una cuestión teórica del análisis armónico que había pasado inadvertida hasta entonces. Hace poco, los investigadores de la Universidad de Illinois Bill Hammack, Steve Kranz y Bruce Carpenter restauraron la máquina de Michelson. Algunos aspectos básicos de su funcionamiento se ilustran a continuación.



5 Esos movimientos se suman gracias a una sensible pieza en suspensión (*centro*), la cual integra todas las contribuciones.

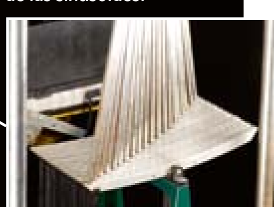


4 En su parte superior, cada barra de amplitudes se une a una palanca en cuyo extremo se engancha un muelle. Las 20 palancas de metal fundido se mueven arriba y abajo en sincronía con los balancines.

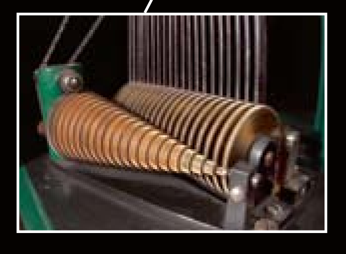




3 El conjunto de bielas transfiere los movimientos oscilatorios de las levas asociadas a los engranajes del cilindro a un conjunto de balancines de forma cóncava, cuyo radio de curvatura coincide con la longitud de las barras de amplitud que los sustentan. Las posiciones de estas 20 barras a lo largo de los brazos basculantes establecen los coeficientes de las sinusoides.



6 Una barra conectada a un rotulador dibuja la resultante del movimiento.



2b Dado que tienen tamaños distintos, cada rueda del cono genera una frecuencia de giro diferente en la correspondiente rueda del cilindro. Mediante una leva, cada una mueve una biela que sube y baja. Esta combinación de elementos produce las 20 frecuencias utilizadas en el analizador.



1 Una manivela proporciona la única fuerza motriz. Su movimiento se transmite al resto de los componentes mediante una cadena de bicicleta y una rueda dentada. Girar la manivela equivale a recorrer del mínimo al máximo los posibles valores de *x*.

2a La rueda dentada asociada a la manivela hace engranaje con la primera de un conjunto de 20 ruedas dentadas dispuestas en forma de cono que rotan al unísono. La menor tiene 6 dientes; cada una de las siguientes, 6 más que la anterior. El cono se encuentra conectado rueda a rueda con otro conjunto de ruedas de tamaño fijo y dispuestas en forma de cilindro.

DE: *ALBERT MICHELSON'S HARMONIC ANALYZER: A VISUAL TOUR OF A NINETEENTH CENTURY MACHINE THAT PERFORMS FOURIER ANALYSIS.* BILL HAMMACK, STEVE KRANZ Y BRUCE CARPENTER, ARTICULATE NOISE BOOKS, 2014. IMÁGENES CORTESÍA DE BILL HAMMACK

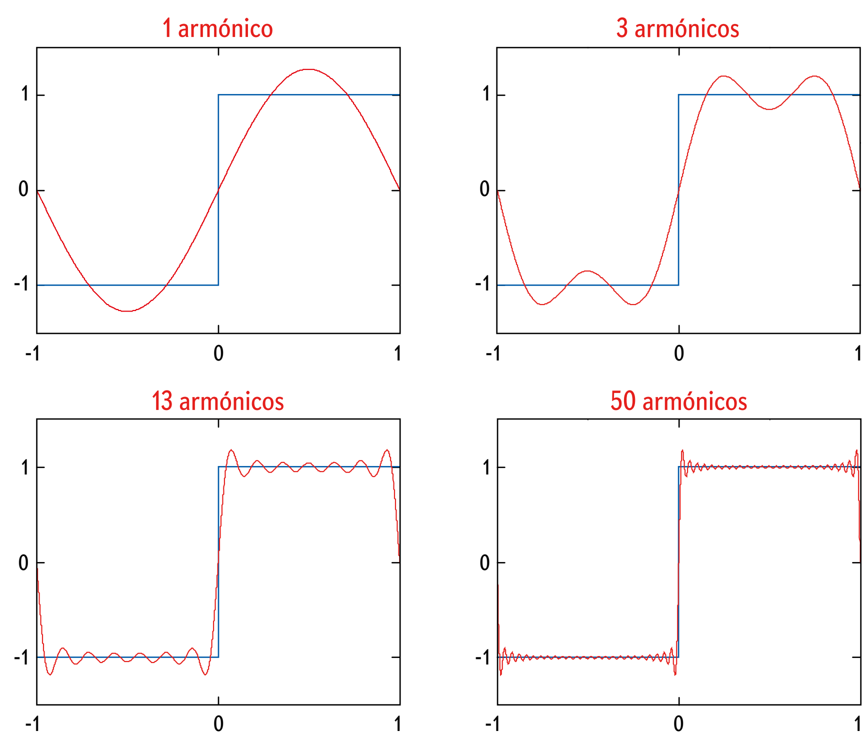
y fabricado en 1897 por el premio nóbel de física Albert Michelson (1852-1931), el del famoso experimento relativista de Michelson-Morley. A principios del siglo xx, calcular los coeficientes de una serie de Fourier y representarla suponía una tarea manual muy costosa e ingrata. Michelson expresó así la necesidad de mecanizar el proceso: «Para calcular o construir gráficamente la resultante de un gran número de movimientos armónicos simples, sería deseable disponer de una máquina sencilla y lo bastante exacta que nos ahorrase el considerable tiempo y mano de obra necesarios en este tipo de cálculos».

Esa necesidad llevó a Michelson a inventar y construir su analizador de armónicos. En la bibliografía de su tiempo solo encontró inspiración en un «instrumento práctico»: una máquina para predecir mareas construida en 1876 por Lord Kelvin, la cual constaba de un analizador armónico diseñado por su hermano James.

Un analizador armónico realiza básicamente dos tareas: análisis de Fourier, que determina qué funciones sinusoidales con sus respectivos pesos constituyen la serie de Fourier de una función graficada; y síntesis de Fourier, que nos presenta el resultado gráfico de sumar un conjunto de funciones sinusoidales pesadas de una determinada manera.

Con una base de 30 × 50 centímetros y una altura de metro y medio, el analizador armónico de Michelson realizaba esta última labor a partir de una manivela, cuyo movimiento se transmitía al resto de los componentes hasta alcanzar un rotulador que pintaba la señal. En el interior, dos conjuntos de 20 engranajes conectados a un sistema de levas, bielas, balancines y muelles producían las 20 frecuencias empleadas por el analizador. Para entender el ingenioso funcionamiento de la máquina, resulta más que recomendable visitar www.engineerguy.com/fourier y ver los excelentes y didácticos vídeos producidos por Hammack y sus colaboradores.

Más tarde se propusieron otros analizadores mecánicos, como el del matemático Olaus Henrici, en 1895, o el analizador armónico de Otto Mader y A. Ott, diseñado a principios de siglo xx a partir de una sugerencia del famoso estadístico Udny Yule. Todos ellos nos parecen hoy curiosidades históricas que contemplamos con condescendencia, pero su naturaleza mecánica aporta una manera alternativa y fascinante de explorar la belleza de la matemática. De hecho, el analizador de Michelson ayudó a revelar y entender un curioso fenómeno del análisis de Fourier.



SUCESIVAS APROXIMACIONES a la función onda cuadrada (*azul*) por truncamiento de su serie de Fourier con 1, 3, 13 y 50 armónicos (*rojo*).

El fenómeno de Gibbs-Wilbraham

Si volvemos a fijarnos en las aproximaciones armónicas de la onda cuadrada, vemos que estas se parecen cada vez más a la función original. Pero, como descubrió Michelson gracias a su máquina, alrededor de las discontinuidades se produce una especie de «baile de San Vito»: una fluctuación incontrolable que impide que la señal y la aproximación coincidan.

En un principio, Michelson pensó que la discrepancia se debería a un error mecánico. Pero, tras descartar esa posibilidad, se decidió a plantear la cuestión en una nota enviada a *Nature* en 1898. Así comenzó una disputa con el matemático A. E. H. Love a la que luego se sumaron J. Willard Gibbs y Henri Poincaré.

Tras varios errores, Gibbs logró explicar el fenómeno: al tomar más y más términos de la serie, la amplitud de las oscilaciones decrece en todas partes excepto cerca de la discontinuidad, donde la sobreestimación de la función original tiende a un máximo que Gibbs calculó en un 8,9 por ciento del total del salto. Hoy ese valor lo tienen muy en cuenta, entre otros, los ingenieros eléctricos al diseñar circuitos con saltos de potencial.

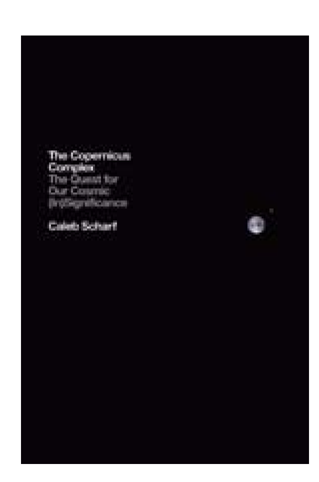
Así pues, fue un artilugio mecánico el que puso en el candelero una cuestión teórica que había escapado a los matemáticos desde que Fourier presentara sus series en 1807. El nombre «fenómeno de Gibbs» fue introducido en 1906 por Maxime Bôcher en un artículo donde extendía el resultado. Pero, sorprendentemente, alguien lo había observado y explicado medio siglo antes: el matemático Henry Wilbraham, en un trabajo de 1848 que pasó inadvertido y que solo fue rescatado del olvido por Horatio S. Carslaw en 1925. ¿Cómo llegó Wilbraham a semejante resultado? Tal vez gracias a otro ingenio mecánico: la máquina del tiempo de Wells.

PARA SABER MÁS

The steampunk bible: An illustrated guide to the world of imaginary airships, corsets and goggles, mad scientists, and strange literature. Jeff VanderMeer y S. J. Chambers. Abrams Books, 2011.

Dr. Euler's fabulous formula: Cures many mathematical ills. Paul J. Nahin. Princeton University Press, 2011.

Albert Michelson's harmonic analyzer: A visual tour of a nineteenth century machine that performs Fourier analysis. Bill Hammack, Steve Kranz y Bruce Carpenter. Articulate Noise Books, 2014.



THE COPERNICUS COMPLEX. THE QUEST FOR OUR COSMIC (IN)SIGNIFICANCE

Por Caleb Scharf. Allen Lane, Londres, 2014.

Léase un extracto de este libro en «Insignificancia cósmica», por Caleb Scharf, en este mismo número.

Copernicanismo

Principio copernicano, principio cosmológico y principio antrópico

Para apear al hombre de pretendidos pedestales se recuerda que Copérnico lo sacó del centro del universo, Darwin le quitó su singularidad en el reino animal y Freud le despojó del cetro de la consciencia. El principio de Copérnico establece que el Sol, y no la Tierra, ocupa el centro del cosmos; igual que el resto de los planetas, esta gira en órbita alrededor del astro. Lejos de ocupar el ombligo del mundo, vivimos en un suelo astronómicamente irrelevante. Salvo por la presencia de vida. Tierra y vida han tejido una historia entrelazada que se inició hace unos 3800 millones de años. Pero nada obsta que no seamos más que un mundo ocupado entre miles de millones. Y lo que pudiera resultar incluso más sorprendente, cabría incluso admitir que el nuestro sea uno en un conjunto cuasi infinito de universos que emergen a partir de las características fundamentales del vacío. Cuando Copérnico propuso que la Tierra no constituía el centro, fijo, del universo sacudió los cimientos de la ciencia occidental. Pero el principio copernicano nunca fue absolutamente cierto. Vivimos en un tiempo particular, en un lugar determinado y bajo circunstancias específicas.

Nicolás Copérnico expuso su modelo heliocéntrico en *De revolutionibus orbium coelestium*, aparecido en 1543. A finales de la centuria, se conoció una novedosa técnica que incrementaba el tamaño de los objetos observados a través de una serie de objetivos. Galileo Galilei, con su telescopio manufacturado, contempló lunas de Júpiter y fases de Venus, convenciéndose de que Copérnico tenía razón. Johannes Kepler avanzó un paso más y estableció que las órbitas de los planetas, la Tierra incluida, no trazaban círculos perfectos, sino elipses excéntricas, poniendo en cuestión la idea de un universo racional. En 1687, Isaac Newton publicó sus monumentales *Philosophiae naturalis principia mathematica*, que establecían las leyes de la gravitación y de la mecánica, con la inclusión de los conceptos de inercia, momento, fuerza y aceleración. Newton se percató de que la atracción entre los cuerpos podía describirse a través de una fuerza que aumentaba con la masa y disminuía con el inverso del cuadrado de la distancia. A partir de esa hipótesis derivó la prueba matemática de las leyes empíricas de Kepler. Demostró que las reglas que gobiernan los planetas emergen de la física fundamental.

Con anterioridad, en 1674, Anthony van Leeuwenhoek fabricó el primer microscopio y lo aplicó a una gota de agua de un lago cercano. Descubrió un mundo desconocido hasta entonces y habitado por extrañas figuras espirales y enroscadas, manchas animadas, seres acampanados con sutiles colas, que iban, venían, giraban y nadaban con absoluta despreocupación de la mirada ajena. En sus reiteradas observaciones descubrió miles de animálculos que nadaban en repulsivos océanos en miniatura, un submundo microbiano que representa el grueso de la vida sobre el planeta.

El principio copernicano tuvo un precedente en Aristarco de Samos, que vivió en el siglo III a.C. También él propuso que la Tierra giraba alrededor del Sol. Era una idea extraña en aquellos tiempos. Los recuerdos, fragmentarios, que nos han llegado de su obra se refieren a los argumentos geométricos esgrimidos para defender que el Sol era notablemente mayor que la Tierra. De ahí dedujo que el astro residía en el centro del universo conocido y que las estrellas se encontraban sumamente distantes. Para ello necesitaba entender el fenómeno de la paralaje (desplazamiento aparente de un objeto distante, con respecto a un fondo mucho más alejado, cuando lo contemplamos desde dos posiciones diferentes). Cuanto más alejados se hallen los objetos, menor será el desplazamiento aparente.

Con anterioridad, Aristóteles había despreciado ya la posibilidad de que las estrellas se hallaran más lejanas que los planetas, apelando a la falta de paralaje. El argumento de Aristóteles se basaba en la razón y en el sentido común. Creía que, si no podía observarse paralaje en las estrellas, si no existía desplazamiento relativo mutuo, deberían encontrarse fijas en alguna capa del firmamento que nos rodea. La cosmología de Aristóteles constaba de unas 55 esferas concéntricas, cristalinas y transparentes en torno a la Tierra que posibilitaban la acción y el movimiento de los planetas. En este universo geocéntrico, estrellas y planetas giraban a nuestro alrededor. Mas, a diferencia de las estrellas, los planetas se movían de una manera complicada. Estos movimientos singulares constituían una pieza importante del rompecabezas que Aristarco y, más tarde, Copérnico se aprestaron a solucionar, destronando a la Tierra. La palabra planeta, de origen griego, significa «estrella errante». Los planetas brillan al reflejar la luz y parecen moverse en relación a las estrellas; a veces vuelven hacia atrás, en movimiento retrógrado, formando una suerte de bucles. Modifican su brillo e incluso velocidad aparente en diferentes tiempos.

Apolonio de Pérgamo, en el siglo II a.C., aportó una primera solución al problema planetario, explicación que incluyó más tarde Claudio Ptolomeo, cuyo *Almagesto* se convertiría en texto canónico sobre cosmología a lo largo de 1400 años. En el sistema ptolemaico la Tierra se halla estacionaria y ocupa el centro del cosmos. En dirección hacia el exterior se encuentran la Luna, Mercurio, Venus, el Sol, Marte, Júpiter y las estrellas fijas. Todos seguían trayectorias circulares. Para conjugar esos movimientos con los movimientos erráticos que aparecían en el firmamento, Ptolomeo añadió un conjunto de movimientos adicionales: deferentes y epiciclos.

Copérnico había recibido una cuidadosa formación en matemática y astronomía en su Polonia natal. Prosiguió sus estudios en Italia, donde se interesó en las desviaciones de la Luna y los planetas respecto del sistema ptolomaico. A comienzos de 1500 esbozó lo que más tarde sería su modelo heliocéntrico: el *Commentariolus*, que no se publicó en vida del autor, aun-

que circularon varias copias del original. Para Copérnico, la distancia de la Tierra al Sol es imperceptible si la comparamos con la distancia a las estrellas, por lo que no se observa paralaje en las estrellas; la rotación de la Tierra explica la aparente rotación diaria del Sol y las estrellas fijas a través del firmamento; las variaciones anuales del movimiento celeste del Sol están, en realidad, causadas por la revolución de la Tierra alrededor del Sol; el movimiento retrógrado que observamos para los planetas se halla causado por el movimiento de la Tierra. Y agrega en el *Commentariolus*: «Basta el movimiento de la Tierra para explicar las irregularidades de los cielos». Tras la edición del *De revolutionibus* menudearon las voces críticas contra la tesis ptolemaica, no siempre relacionadas con Copérnico. Así, Giordano Bruno, que nació en 1548, defendió no solo el heliocentrismo, sino también la idea de un universo realmente infinito, del que el Sol era una estrella más. Abogaba por un número ilimitado de mundos habitados.

Por las mismas fechas, Tycho Brahe daba pasos importantes en la observación astronómica. Sin telescopios, aunque con ingeniosos aparatos de medición, con nuevas versiones de cuadrantes, sextantes y esferas armilares midió ángulos, posiciones y sistemas de coordenadas. Cierta noche de 1572, descubrió una nueva estrella en el firmamento. No había estado allí las noches precedentes, por lo que dedujo que el universo no era inmutable, sino que podía cambiar. Se supone que lo que Tycho observó fue una supernova, una explosión espectacular de una enana blanca, a unos 8000 años luz del sistema solar. Brahe contó con la ayuda de Johannes Kepler en las tabulaciones de las posiciones y variaciones de los cuerpos celestes. Por su propia cuenta este publicó *Astronomia nova,* donde presentaba sus dos primeras leyes del movimiento planetario: la trayectoria de cada planeta dibuja una elipse con un foco en el Sol y el radio vector que une un planeta y el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales. El año en que murió Galileo, 1642, nació Newton.

Para Newton, la belleza explicativa de la física del movimiento planetario constituía una prueba de la divinidad suprema, que mantenía las trayectorias de los planetas en una danza perfecta cronométrica. Para otros pensadores del siglo siguiente, como Pierre-Simon Laplace, ello significaba justamente lo contrario. No se necesitaba ninguna mano guiadora, ni trayectorias o configuraciones preordenadas en un universo copernicano; bastaban las leyes físicas innatas para determinar dónde y cuándo un objeto se hallaría a sí mismo. Armado con esas leyes, y con un conocimiento cabal de todos los lugares y movimientos de todos los cuerpos en un momento dado, Laplace confiaba desentrañar el pasado y el futuro. Tras las huellas de Newton, Christiaan Huygens se manifestó a favor de la posibilidad de vida extraterrestre un poco antes de su fallecimiento en 1695. Huygens estaba convencido de la existencia de pluralidad de mundos. Se imaginaba múltiples lugares hospitalarios de agua y vida abundante, que él decía inferir de sus observaciones telescópicas. El fenómeno de la vida se le antojaba inevitable en otros planetas.

A finales del siglo XIX se comenzó a tomar conciencia de la inmensidad del universo

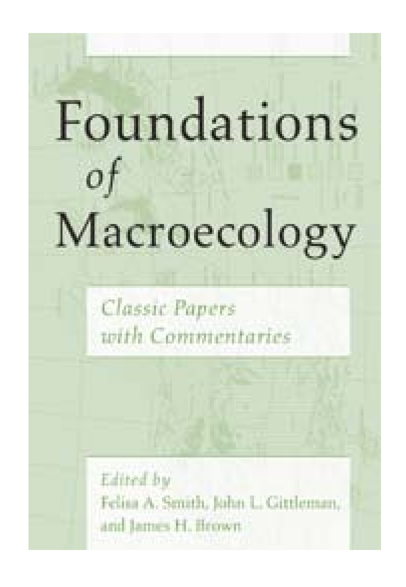
A finales del siglo XIX se comenzó a tomar conciencia de la inmensidad del universo. Se aceptaba que las estrellas se encontraban a distancias enormes. Se habían descubierto nuevos planetas (Urano y Neptuno). A través de los espectros de luz, empezó a revelarse la composición elemental de objetos extraterrestres. Así se descubrió cierta especie atómica en el Sol, el helio. Pero persistían sin respuesta otras cuestiones fundamentales: ¿era infinito en espacio y tiempo el universo? ¿Era la Vía Láctea el universo entero o habría más galaxias, como quizás esas nebulosidades que conformaban Andrómeda? En una eclosión sin precedentes de descubrimientos e invención, en las tres primeras décadas del siglo XX se produjo también una cascada de revoluciones científicas: la teoría de la relatividad de Albert Einstein, la medición de la verdadera escala del cosmos y la naturaleza de las galaxias y el desarrollo de la mecánica cuántica. Las visiones radicales de la naturaleza resultantes abordaban propiedades interrelacionadas que iban de lo macroscópico a lo microscópico.

El modelo heliocéntrico copernicano implicaba que el universo semejaba el mismo, cualquiera que fuera el planeta desde donde lo contempláramos. Podía generalizarse y proclamar que el universo parecería el mismo desde cualquier punto donde nos halláramos, desde nuestro sistema solar o desde otro, desde nuestra galaxia o desde otra. Eso afirma el principio cosmológico, que dicta que el universo es homogéneo e isótropo, esto es, presenta la misma distribución básica de materia y energía. El principio cosmológico constituye una aplicación particular del principio copernicano general aplicado a la cosmología. Hasta la fecha, el principio cosmológico es coherente con la observación astronómica. Una versión rígida de ese principio, denominada principio cosmológico fuerte, sostiene que el universo parecería también el mismo en cualquier momento de su historia pasada o de su futuro.

La primera vez que se puso en conexión el principio cosmológico con el principio copernicano fue a comienzos de los años cincuenta del siglo XX, cuando Hermann Bondi empleó la expresión principio cosmológico copernicano en su exposición de un modelo cosmológico, hoy rechazado, que se conoce por teoría del estado estacionario. La teoría del estado estacionario proponía que el universo era eterno, sin principio ni fin. Bondi defendía que el universo aparecía él mismo en cualquier dirección que mirásemos y para cualquier observador de cualquier tiempo. La prueba final y definitiva de que el universo tenía una edad finita llegó en 1965 con el descubrimiento de la radiación cósmica del fondo de microondas, fotones que se generaron en el cosmos joven.

Los cosmólogos se percataron de la existencia de sorprendentes coincidencias en el valor de constantes físicas fundamentales. Algunas combinaciones de esos números producían unas relaciones inesperadas, que propiciaban la aparición de vida inteligente, como si hubiera una conexión singular entre nuestra presencia y las propiedades físicas actuales del cosmos. A esa vinculación, Brandon Carter la llamó en 1973 principio antrópico. No es fácil acotar las características que revisten mayor interés para la aparición de la vida. Bernard Carr y Martin Rees incoaron un primer esbozo matemático en 1979, que Rees reelaboró en 1999 al reducir a seis números el elenco de exigencias; entre otras, la razón entre la intensidad de la fuerza de la gravedad y la intensidad de la fuerza electromagnética, la densidad total de materia normal del cosmos o el número real de dimensiones espaciales del universo.

—Luis Alonso



FOUNDATIONS OF MACROECOLOGY. CLASSIC PAPERS WITH COMMENTARIES
Coordinado por Felisa A. Smith, John L. Gittleman y James H. Brown. The University of Chicago Press, Chicago, 2014.

Macroecología

Textos canónicos de una disciplina en plena efervescencia

Aunque el término *macroecología* fue acuñado hace unos veinte años, el planteamiento macroecológico cuenta con una historia secular. James H. Brown, de la Universidad de Arizona, y su alumno Brian A. Maurer se percataron de la importancia de los censos (abundancia media, tamaño del rango geográfico y tamaño corporal de los individuos) para estudiar las tendencias de las poblaciones en determinados ecosistemas. Brown y Maurer pensaban que su labor podría inscribirse en una suerte de «mecánica estadística» aplicada a ecosistemas, pero la expresión *ecología estadística* había recibido ya otro uso. Y acuñaron el término *macroecología* para reflejar la idea de que la ecología avanzaba con el estudio conjunto de muchas especies. Publicaron en el número de *Science* del 3 de marzo de 1989 el ensayo «Macroecology: The division of food and space among species on continents», donde ofrecían una visión sintética del dominio, fundamentos conceptuales y apartados empíricos y teóricos que conformaban la nueva disciplina.

Pero no se partía de la nada. Desde los naturalistas españoles del siglo XVI y posteriores, desde Linneo y sus discípulos, con particular énfasis en los biogeógrafos del siglo XIX y cuantos vinieron después, se practicaba una macroecología *avant la lettre*. Más cercanos en el tiempo, entre los años 1920 y 1998, la disciplina fue adquiriendo músculo y se gestaron los conceptos clave: relaciones entre superficie y especie, relación entre tamaño corporal y tasa metabólica, gradiente latitudinal de la abundancia de especies, etcétera. De todo ello se ocupa esta obra, que se divide en dos partes, a saber, macroecología antes de la macroecología y dimensiones de la macroecología. A cada ensayo original le acompaña un comentario que lo enmarca en su tiempo y evolución del tema.

Tras un período de inducción, centrada en la cuantificación de pautas empíricas, llegaron las explicaciones deductivas a partir de hipótesis y creación de modelos para interpretar los datos. Abrió surco Olaf Arrhenius en 1920 con un trabajo sobre la relación entre áreas y especies. Para Arrhenius, esa relación podía expresarse mediante una fórmula matemática sencilla, una función potencial. Aunque desde mediados del siglo XIX había constancia de las pautas del incremento de la diversidad específica con el área de la muestra, Arrhenius lo caracterizó cuantitativa y analíticamente; ajustó las relaciones entre especies y áreas a leyes de potencias. Esa línea de investigación (formulación matemática de las relaciones) fue seguida por C. B. Williams, Frank Preston, Robert MacArthur y Edward O. Wilson.

A lo largo de los dos últimos decenios, hemos asistido a un crecimiento exponencial del número de publicaciones sobre macroecología. Han aumentado a un ritmo del 34 por ciento anual, lo que supera de lejos el crecimiento del 2,5 por ciento registrado en el resto de las disciplinas científicas. No se trata de divagaciones sobre cuestiones marginales, sino que en buena medida se abordan temas centrales, como el trabajo recién publicado en *Science* sobre la paradoja que representa que la mayoría de los ecosistemas que mantienen una abundante vida vegetal no parezcan resentirse de la acción de los herbívoros. En torno al particular se había avanzado una doble hipótesis: de acuerdo con la primera, las plantas se beneficiarían de la presencia de carnívoros; de acuerdo con la segunda hipótesis, la resistencia se debería a la adquisición de defensas químicas y estructurales por las propias plantas. Se propone ahora una explicación en la que la solución reside en la interacción entre ambos fenómenos.

La macroecología se caracteriza por la descripción y explicación de pautas y procesos en escalas espaciales y temporales diversas. La disciplina se centra en las propiedades estadísticas emergentes de un número elevado de «partículas» ecológicas, sean genes, individuos, poblaciones o especies. Se parte de una tesis admitida: las pautas estadísticas que son similares a través de escalas temporales, espaciales o ambas obedecen a mecanismos causales similares. Aunque formalizada en trabajos de James H. Brown y Brian A. Mauer, esa perspectiva la encontramos ya en François de Liocourt, quien en 1898 estudiaba la influencia de las prácticas de gestión de los bosques franceses. De Liocourt halló que, en la naturaleza, el número de árboles declinaba exponencialmente con el crecimiento del diámetro del tronco. Con anterioridad, Augustin Pyramus De Candolle había reparado ya en otra pauta macroecológica, la relación entre extensión del terreno y especie; por su parte, Alfred R. Wallace registró el gradiente latitudinal de la riqueza de especies.

Es sabido que muchas características de los organismos varían sistemáticamente con el tamaño del cuerpo. Esas relaciones aparecieron cuantificadas y sintetizadas en libros seminales sobre alometría por D'Arcy Thomson y Julian Huxley a comienzos del siglo XX. Pero fue el trabajo de Max Kleiber de 1932 el que despertó el interés y estimuló la investigación subsiguiente sobre relaciones de escala en el tamaño corporal. Kleiber puso de manifiesto la relación entre tamaño corporal y tasa metabólica. Descubrió que la tasa metabólica de mamíferos y aves era proporcional a la potencia 3/4 de su masa corporal. Esa propuesta ponía en cuestión las ideas establecidas sobre tasa metabólica que la situaba en una potencia 2/3, así como otros rasgos con característica de potencias 1/3 que reflejaban las escalas de longitud, superficie y volumen. El artículo de Kleiber y el libro subsiguiente (*The fire of life*) continúa siendo objeto de acicate para la investiga-

ción. Un decenio después, Ronald Fisher trajo a primer plano la distribución de la abundancia de especies.

C. B. Williams reúne méritos suficientes para ser considerado padre de la macroecología. En 1947, acometió una de las primeras aplicaciones del análisis de modelo nulo. Abordó el problema con un enfoque estadístico, pues en la mayoría de las comunidades animales y vegetales, los géneros con una, dos, tres... especies forman una serie matemática cercana a una serie logarítmica. Un año antes, J. Elton había demostrado que la razón entre especie y género en comunidades insulares pequeñas. Por encima de cualquiera de sus antecesores y contemporáneos, Williams no solo documentó las pautas generales de abundancia, distribución y diversidad de especies, sino que advirtió que muchos de esos patrones hundían sus raíces en procesos fundamentales del uso de los recursos, demografía, dispersión, especiación, extinción y asociación de las comunidades. Resumió su pensamiento en *Patterns in the balance of nature and related problens in quantitative ecology* (1964), la primera síntesis de macroecología. Este libro reclamó la atención sobre la existencia de pautas empíricas estadísticas generales. En su mayoría, las unidades de los ejemplos eran las especies. Unos años más tarde, R. W. Sheldon y su equipo extendieron el horizonte de la macroecología; mostraron que algunas de esas pautas generales eran independientes de las especies linneanas. La abundancia de organismos pelágicos en el océano reflejaba una distribución de ley de potencias de suerte tal que la biomasa total permanecía invariante, del plancton a las ballenas.

G. E. Hutchinson fue el ecólogo de mayor influencia a mediados del siglo xx. Con Robert MacArthur, su alumno más brillante, escribió un artículo programático: cuantificaron la distribución de frecuencias del tamaño corporal entre especies de mamíferos. Develaron la heterogeneidad cuasi fractal del entorno, quince años antes de que Benoît Mandelbrot describiera el fenómeno de la fractalidad y acuñara el término. Si examinamos la fauna de cualquier zona, escribían en 1959, Hutchinson y McArthur, observamos que los grupos que contienen un número mayor de especies son, por regla general, las de tamaño pequeño. Dieron ellos a conocer un modelo de distribución del tamaño entre especies animales. Se trataba de un modelo basado en el nicho.

Los biólogos tardaron en apreciar la importancia de la alometría en ecología. Uno de los primeros en integrarla fue Brian MacNab, quien puso de manifiesto que la tasa metabólica, al fijar las exigencias de alimentación, condicionaba la influencia de los animales sobre el uso del espacio. Todos los animales se encuentran limitados en la extensión de su deambulación diaria. Resulta obvio que el tamaño del mamífero condiciona el radio máximo de acción. Pero el tamaño corporal comporta otra influencia independiente: las especies mayores deben adquirir más energía para hacer frente a sus requerimientos que las especies menores. McNab mostró que el área del espacio empleado por un individuo variaba siguiendo una ley potencial con la masa del cuerpo y difería sistemáticamente entre herbívoros y carnívoros.

La gran mayoría de las investigaciones pioneras sobre tamaño corporal y alometría se realizaron sobre animales. Las plantas presentan una variación enorme en tamaño corporal y su influjo sobre morfología, fisiología y ecología. Debemos a J. Yoda y sus colaboradores uno de los primeros trabajos alométricos en vegetales. En 1963 dieron a conocer un patrón general de autoaclareo o autoatenuación: se incrementa el tamaño y disminuye la densidad.

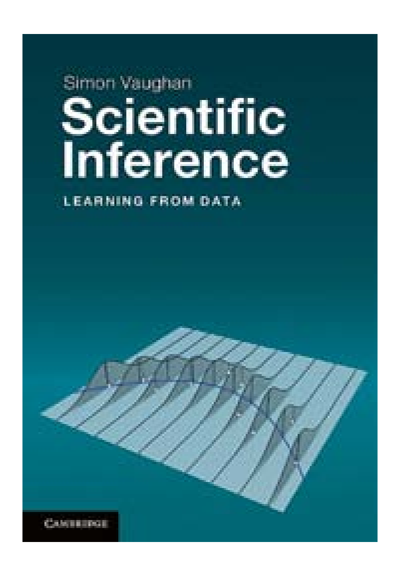
En los años sesenta se generalizaron varios métodos para calcular la cantidad y distribución de material particulado suspendido en el medio marino: filtros de diferente tamaño de poro, conteo, medición con el microscopio y medición de la dispersión y transmisión de la luz. Se conoció también el contador de Coulter, que poseía la doble ventaja de ser más rápido y ofrecer resultados más finos. El espectro de tamaños de un material particulado en el mar, reseñaban, en 1967, R. W. Sheldon y T. R. Parsons, se expresa mediante el volumen de la partícula en función del logaritmo del diámetro de la partícula. Constituye hoy, proseguían, la forma de presentar los datos que proporciona mayor información; además, su aplicación resulta muy apta para la división clásica entre nanoplancton, microplancton y macroplancton. La relación entre el tamaño de una partícula y el número de partículas de ese tamaño se convertiría en una de las pautas macroecológicas fundamentales en ecología marina.

El espectro del tamaño acuático se parece a la ley del autoaclareo de los árboles de Yoda, otra pauta macroecológica fundamental. Ambas relaciones se centran en la distribución de frecuencias del tamaño en un ecosistema. Sin embargo, el autoaclareo se centra en el tamaño de un solo nivel trófico (árboles), mientras que el espectro de tamaño acuático comprende taxones muy dispares y grupos tróficos múltiples (fitoplancton, zooplancton, herbívoros y peces depredadores).

En buena parte de su historia, el estudio del registro fósil fue coto privado de la paleontología, rama de la geología hasta que, con el advenimiento de la nueva síntesis darwinista y las publicaciones seminales de G. G. Simpson, pasó a formar parte de la biología. Desarrolló entonces un enfoque más abarcador y holista de la historia de la vida y se transformó en paleobiología. Ahora, la investigación paleoecológica constituye un recurso imprescindible en macroecología y aporta una perspectiva temporal esencial sobre pautas y procesos. Al poner de manifiesto que los conjuntos fósiles formaban comunidades ecológicas y analizar su composición empleando un marco comparado cuantitativo y un marco funcional, el trabajo de E. C. Olson marca un hito en paleoecología y macroecología.

La producción primaria neta es una variable de interés capital en macroecología, aunque hasta los sesenta y los setenta no se obtuvieron estimaciones fiables de las tasas de producción primaria en medios continentales y acuáticos. Michael Rosenzweig demostró que la producción primaria neta podía predecirse a partir de variables climáticas básicas recogidas en las estaciones meteorológicas. No es fácil estudiar el mar en su inmensidad. Por eso, la ecología marina ha ido en muchos aspectos a remolque de la ecología continental. La zona intermareal ha constituido una fuente fecunda de inspiración para muchos ecólogos y en ella se han realizado importantes experimentos. En los años sesenta, los ecólogos eran conscientes de las pautas a macroescala de la diversidad marina, tales como la riqueza de los hábitats de arrecife tropical o la menguada cuantía de especies de algunos hábitats polares. Entre los métodos resaltados para medir la diversidad del bentos aparece aquí el índice de Margalef, en honor del ecólogo español Ramón Margalef López, que lo propuso en 1957 y cuya formulación reza: $d = (S - 1)/\ln N$, donde S designa el número de especies, N es el número de individuos y d indica el índice de diversidad.

—*Luis Alonso*



SCIENTIFIC INFERENCE. LEARNING FROM DATA

Por Simon Vaughan. Cambridge University Press; Cambridge, 2013.

Cuestiones metacientíficas

Inferencia científica y sus clases

Existen diferentes corrientes de filosofía de la ciencia, pero todas reconocen determinados elementos característicos del método científico. Cuatro de manera señalada: teoría (hipótesis o modelo propuesto), predicciones (sobre los datos posibles), datos e inferencia. Una hipótesis, un modelo, constituye una explicación de un fenómeno en términos de otros o una sugerencia de nexo entre fenómenos; además, una hipótesis útil permitirá que se avancen predicciones sobre el resultado de los experimentos u observaciones. Lo que distingue a la ciencia de otras disciplinas es la contrastación de las ideas con la realidad de la naturaleza; corresponde a las hipótesis formular predicciones que puedan someterse a contrastación empírica. Las observaciones que encajan con las predicciones de una hipótesis se consideran prueba en apoyo de la hipótesis. Si las observaciones difieren significativamente de las predicciones, entonces se toman por prueba contra la hipótesis. La inferencia remite a la comparación entre predicciones y observaciones que nos permite manejar información sobre la hipótesis o modelo.

No solo los filósofos se ocupan de esas cuestiones. Al abrir un libro científico e incluso una revista especializada no es infrecuente que nos encontremos, siquiera de forma indirecta, con problemas metacientíficos y reflexiones epistemológicas. El ejemplo de la inferencia es paradigmático. Tomemos un caso al azar: el entorno planetario. En 1917 y para explicar la depresión del componente horizontal del campo magnético de la Tierra durante las tormentas geomagnéticas, emergió la idea de la plausible existencia de una corriente anular de partículas atrapadas que ceñían a la Tierra en altas latitudes. Una hipótesis que resultó ser acertada, tras realizarse, medio siglo después, mediciones del alcance y composición de esa corriente. Más tarde se observaron corrientes anulares de una naturaleza diferente en Júpiter, exactamente en 2001, y se infirieron en Saturno. Inferencia que se transformó en demostración en 2007 merced a las imágenes de la corriente anular en cuestión, tomadas por la sonda espacial *Cassini*. La corriente de Saturno, altamente variable, presenta fuertes asimetrías longitudinales que giran (corrotan) casi rígidamente con el planeta.

La matemática, por su parte, se basa en el razonamiento deductivo. Partimos de axiomas, aplicamos las reglas de la lógica y llegamos a teoremas. (Hemos de distinguir entre teorías y teoremas; los teoremas son producto del razonamiento deductivo; no así las teorías.)

Por inferencia hemos de entender el proceso que consiste en extraer una conclusión a partir de premisas o supuestos, un proceso que nos traslada desde la aceptación (a menudo provisional) de una proposición a la aceptación de otras; evalúa entre enunciados. También se llama inferencia a la propia conclusión. Es un concepto ligado al de argumento, constituido por un conjunto de enunciados, uno de los cuales es la conclusión y el resto lo forman las premisas. La creencia es esencial en la inferencia. Solo hay inferencia si, en razón de la creencia en las premisas, aceptamos la conclusión o afianzamos nuestra adhesión a esta con mayor firmeza que antes. Ahora bien, nadie infiere deliberadamente una contradicción. En una *reductio ad absurdum* el argumento deduce una autocontradicción a partir de determinadas premisas; infiere que ciertas premisas son contradictorias. Una inferencia deductiva válida se corresponde con un argumento deductivo válido. Es lógicamente imposible que todas las premisas sean verdaderas cuando la conclusión es falsa.

La lógica y la epistemología clásicas distinguieron varias clases de inferencia y esbozaron algunos principios para separar las buenas inferencias de las malas. Entendida como deducción o ajuste de una creencia ante una nueva información, se reconocen tres modos de inferencia: deductiva, inductiva y abductiva. En las teorías deductivas, una inferencia se justifica si se conforma con un argumento válido. Desde Frege se mantiene que, aunque la inferencia sea un proceso psicológico (creencia), los principios que la hacen deductivamente correcta son válidos independientemente de cualquier hecho psicológico.

El razonamiento inductivo es un tipo de razonamiento no deductivo. De la inducción se dice que describe argumentos procediendo de casos particulares a casos generales, de los efectos a las causas. Si observamos que el Sol sale cada amanecer a lo largo de muchos días, podemos razonar inductivamente que lo hará también en días ulteriores. No podemos deducir directamente que mañana no saldrá el Sol. (No existe contradicción lógica si no sale.) De donde se desprende que el razonamiento inductivo no tiene la misma fuerza que el razonamiento deductivo: una conclusión a la que se llega a través de un razonamiento deductivo es necesariamente verdadera si las premisas son verdaderas, en tanto que una conclusión alcanzada a través de razonamiento inductivo no es necesariamente verdadera, pues se basa en información incompleta. No podemos deducir (demostrar) que el Sol saldrá mañana, lo que no obsta para que tengamos confianza en que así ocurra.

Podríamos resumir que el razonamiento deductivo concierne a enunciados que son verdaderos o falsos, mientras que el razonamiento inductivo concierne a enunciados cuyo valor de verdad se desconoce y sobre los cuales es mejor hablar de grado de creencia o de confianza. Pongamos un ejemplo: 1) premisa mayor: a todos los monos que hemos estudiado les gusta la uva; 2) premisa menor: Zipi es un mono; 3) conclusión: a Zipi le gusta

la uva. La conclusión no es inevitable y caben otras conclusiones. No existe contradicción si concluimos: a Zipi no le gusta la uva. Pese a todo, las premisas ofrecen cierta información. Parece plausible, probable incluso, que a Zipi le gusten las uvas.

Las inferencias inductivas se proyectan más allá de los datos conocidos. De la observación pertinaz de que las esmeraldas que vamos descubriendo son verdes inferimos, generalizamos, que todas las esmeraldas son verdes. Desde los tiempos de Francis Bacon, los filósofos se han afanado en la búsqueda de una lógica inductiva que especificara las condiciones bajo las cuales se justificasen tales proyecciones. Pero las objeciones parecen inapelables. Ejemplo histórico famoso es el problema de Hume. David Hume (1711-1776) denunció la propensión humana a formular predicciones a partir de regularidades observadas; mostró que no había base racional para ello. Volviendo al caso de las esmeraldas, que todas las vistas hasta ahora sean verdes es un hecho que no nos faculta para decidir que todas las demás lo serán también. El razonamiento inductivo mantiene connotaciones evidentes con el razonamiento probabilista. Se acepta que una inferencia está justificada si es conforme con los teoremas del cálculo de probabilidades.

También la abducción suele considerarse un caso especial de la inducción, en cuanto establece creencias genéricas a partir de datos conocidos. Desde hace algún tiempo importa sobre todo la abducción que es inferencia a partir de la mejor explicación, un medio de justificar la propuesta avanzada de fenómenos inobservables basándose en la fuerza de las explicaciones esgrimidas sobre fenómenos observables. En una inferencia a partir de la mejor explicación se acepta un enunciado porque constituye la mejor explicación disponible de las pruebas aducidas; se trata de derivar la conclusión que mejor explique las premisas. El concepto de inferencia a partir de la mejor explicación fue formulado por Gilbert Harman en un artículo publicado en 1965 («The inference to the best explanation»).

La regla lógica de la inferencia tiene un antecedente clásico en otro famoso ensayo, de Lewis Carroll: «What the tortoise said to Achilles», aparecido en la revista *Mind* en 1895. Planteaba, a la manera de Zenón, el problema del inicio de una prueba. Supongamos que poseo como premisas (1) p y (2) $p \to q$. ¿Puedo inferir q? Solo, tal parece, si estoy seguro de (3) $(p \;\&\; p \to q) \to q$. ¿Puedo entonces inferir q? Solo, tal parece, si estoy seguro de (4) $(p \;\&\; p \to q \;\&\; (p \to q) \to q) \to q$. Para cada nuevo axioma (N) necesito un axioma ulterior ($N + 1$) que declare que lo establecido hasta entonces implica q. La regresión no termina nunca. La solución habitual acostumbra abordar un sistema como si contuviera no solo axiomas, sino también reglas de inferencia, para proceder a partir de los axiomas. La regla del *modus ponens* nos permite proceder de las primeras dos premisas a q.

Lo que distingue a la ciencia de otras disciplinas es la contrastación de las ideas con la realidad de la naturaleza

El libro escolar de Vaughan se centra, sobre todo, en la inferencia estadística, porque la ciencia, razona, no es sobre la certeza, sino que se aplica en el tratamiento riguroso de la incertidumbre. Y para ello echa mano de la estadística. La estadística y el análisis de los datos constituyen, pues, una parte esencial del método científico y de la práctica científica. En la mente del autor, el alumno debe estar capacitado para 1) explicar aspectos del método científico, tipos de razonamiento lógico y análisis de datos, así como analizar críticamente los razonamientos estadísticos y científicos; 2) calcular e interpretar resúmenes estadísticos cuantitativos y gráficos; 3) utilizar e interpretar los resultados de tests estadísticos sobre diferencia y asociación y ajuste de línea recta; 4) utilizar el cálculo de probabilidades para manipular funciones de probabilidad básicas; 5) aplicar e interpretar el ajuste de modelos, sirviéndose de mínimos cuadrados, verosimilitud máxima; 6) evaluar e interpretar intervalos de confianza y tests de significación. Del lector se demanda cierta familiaridad con los rudimentos de cálculo diferencial e integral, y álgebra de matrices.

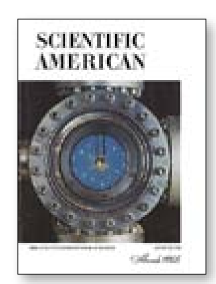
Importa atender a la recogida y manipulación de los datos. Denominado a veces análisis conformacional de datos, podemos dividir el análisis inferencial de los datos en dos tareas: comprobación de modelos y estimación de parámetros. El proceso del que se ocupa la primera consiste en escoger qué modelo, entre un grupos de ellos, aporta la explicación más convincente de los datos; la segunda corresponde al proceso de estimar valores de parámetros desconocidos de un modelo. El análisis inferencial se propone elaborar inferencias razonables y justificadas basadas en datos y en hipótesis.

Hay varias clases de datos. Los tipos principales son los siguientes: categóricos, ordinales, discretos y continuos. Los categóricos toman valores que no son numéricos, sino que pueden acomodarse en categorías específicas (registros de género: varón, mujer; tipos de partículas: piones, electrones, muones, etcétera). Los datos ordinales toman valores que pueden ser ordenados o llevan adjunta una escala, aunque la diferencia entre rangos no puede ser comparada. La escala de Likert, por ejemplo: 1. muy en desacuerdo; 2. desacuerdo; 3. neutro; 4. de acuerdo; 5. muy de acuerdo. Estos tienen un orden definido, pero la diferencia entre las opciones 1 y 2 pudiera no ser la misma que la diferencia entre 3 y 4. Los datos discretos tienen valores numéricos que son distintos y separados (1, 2, 3, etcétera). Pensemos en el número de planetas en torno al Sol o el número de partículas detectadas en un intervalo temporal. Los datos continuos pueden tomar cualquier valor dentro de un intervalo finito o infinito. Podemos contar, ordenar y medir datos continuos; por ejemplo, la energía de una partícula acelerada, la temperatura de una estrella o la intensidad del campo magnético.

Los datos pueden tener muchas dimensiones. Los hay de una sola variable (temperatura de una estrella en una muestra), de dos variables (temperatura y luminosidad de una estrella en una muestra) o varias variables (temperatura, luminosidad, distancia, de las estrellas). En el caso de dos variables, cada punto contiene dos valores, como las coordenadas de un punto en el plano; en el caso de muchas variables, cada punto es un punto en un espacio N-dimensional o vector N-dimensional.

—*Luis Alonso*

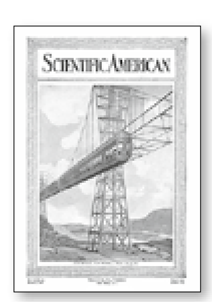
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Marzo 1965

La Tierra como imán

«Desde 1958, las medidas directas sobre las regiones más externas del campo terrestre, obtenidas mediante satélites artificiales y sondas cohete, han convencido a un gran número de geofísicos de que debe revisarse por completo la sencilla imagen que hoy tenemos de ese campo. Lejos de hallarse libre de influencias externas, el campo geomagnético se ve agitado de forma continua por un "viento" de partículas cargadas eléctricamente procedentes del Sol, y está deformado por las corrientes eléctricas que circulan por los cinturones de radiación que circundan el planeta. El resultado neto de todas esas influencias es un campo geomagnético de forma similar a la de una lágrima extraordinariamente alargada. Los análisis de los datos facilitados por las mediciones de los satélites han avanzado hasta una etapa en la que puede representarse con una precisión aceptable la configuración general de la magnetosfera.»



Marzo 1915

Enfermedad en la escuela

«Desde hace poco los educadores están prestando atención al estado físico del alumno escolar medio, en especial en el sur [de EE.UU.], donde se ha descubierto el enorme lastre que supone la anquilostomiasis. Los alumnos se contagian porque las escuelas constituyen focos de infección. En un tiempo relativamente corto se contaminan todos los edificios cercanos a los domicilios de los colegiales y pronto cambia la vida (a causa de la anemia) en la comunidad. Los niños progresan poco en la escuela y el absentismo es alto; la salud de la población es inferior a la normal; los cultivos ya no se cuidan tanto; las casas están peor abastecidas y mantenidas; toda la comunidad está enferma y no lo sabe. Los perjuicios económicos son tremendos.»

Saturno

«Durante los próximos meses, Saturno se hallará en una posición favorable a la observación, y el más hermoso y maravilloso de todos los planetas atraerá la atención de los astrónomos del mundo. Lo que singulariza a Saturno respecto a los demás planetas es el raro sistema de anillos delgados que lo rodea en su plano ecuatorial. Visto desde el ecuador del planeta, el anillo se alza en el firmamento como un arco luminoso, con cada extremo perpendicular al horizonte. Su apariencia sería la de una tenue franja de oro que dividiese la bóveda celeste. Desde Titán, el planeta se observaría como un disco diez veces mayor que el Sol que nosotros vemos. En la figura se representa el planeta tal como lo veríamos desde su luna Titán. —Abbe Th. Moureux, director del Observatorio de Bourges»



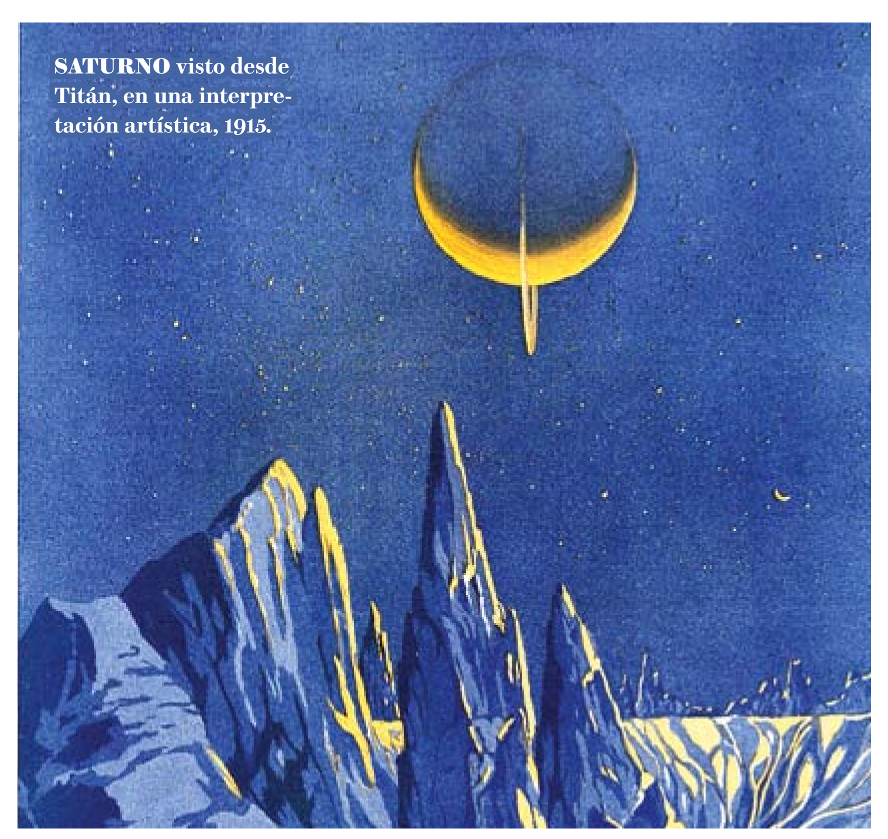
Marzo 1865

Rubidio

«Según los últimos experimentos del profesor Bunsen relativos a la preparación y propiedades de este metal, al parecer puede obtenerse por reducción del tartrito acidífero carbonatado de óxido de rubidio (de modo similar a como se reduce el kalium [potasio]). Es ligero como la plata, de color blanco, con un matiz amarillento apenas perceptible. En contacto con el aire se cubre al instante de una capa gris azulada de subóxido y se inflama (incluso en trozos grandes) a los pocos segundos, mucho más rápido que el kalium.»

Científico (pero medroso)

«Hay flotando una propuesta para construir un ferrocarril desde Siam a China. Y el rey de Siam, si se envía a un ingeniero a examinar la ruta, "le proporcionaría elefantes y le daría protección desde Bangkok, a través de todos sus territorios, hasta Luang Prabang; pero no puede sufragar el pasaje y el salario, y teme que con ello se malgaste su dinero. Teme también que el ingeniero pudiera emborracharse y caerse al río y ahogarse, o morir de disentería por culpa del cambio de clima, o de malaria al viajar por la jungla, como ocurrió con muchos otros, por lo que la empresa se malograría y se desperdiciaría el dinero."»



SATURNO visto desde Titán, en una interpretación artística, 1915.

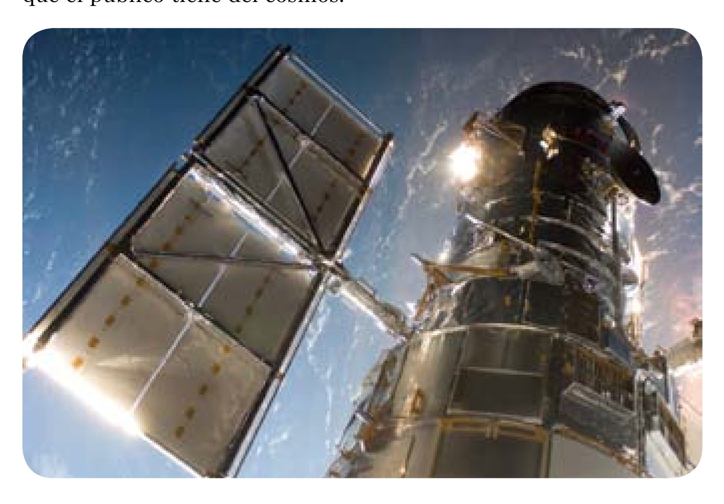
SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXII, N.º 12, 20 DE MARZO DE 1915

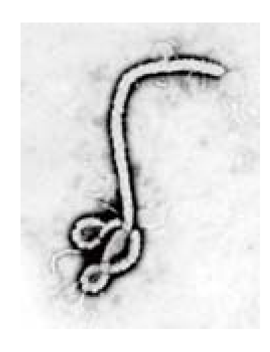
ASTRONOMÍA

25 años del telescopio espacial Hubble

Axel Quetz y Uwe Reichert

Después de un cuarto de siglo, el Hubble sigue siendo uno de los mejores instrumentos astronómicos de todos los tiempos. Sus resultados han acuñado, en un sentido literal, la imagen que el público tiene del cosmos.





SALUD PÚBLICA

La batalla contra el ébola

Helen Branswell

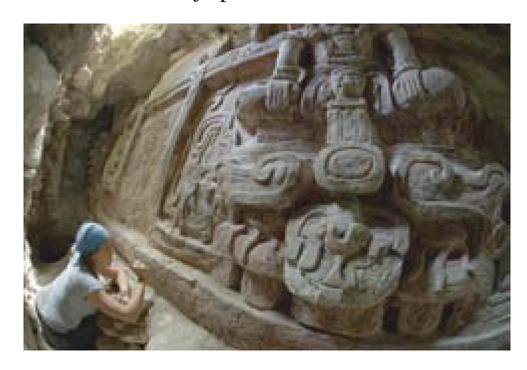
El mayor brote hasta la fecha consigue arrancar el desarrollo de dos vacunas y un par de tratamientos esperanzadores.

ARQUEOLOGÍA

La leyenda del dios de la tormenta

Zach Zorich

El descubrimiento de una obra de arte maya esclarece una vieja polémica.



FÍSICA

Agujeros negros y muros de fuego

Joseph Polchinski

Una nueva propuesta obliga a repensar la relatividad general y la mecánica cuántica de los agujeros negros.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes, ¿Cháchara o sustancia? y La tiranía del factor de impacto*; Andrés Martínez: *Apuntes, Un punto débil de la resistencia bacteriana, El Ártico enferma y La evolución de la arquitectura*; Fabio Teixidó: *Es hora de abandonar el objetivo de los 2 °C*; Marián Beltrán: *La población mundial crece más de lo previsto*; Juan Pedro Adrados: *Más acogedores que la Tierra*; Javier Grande: *(In)trascendencia cósmica y Tras el rastro de los axiones*; José Ó. Hernández Sendín: *Un microscopio para el movimiento*; Bartolo Luque: *Las intrigantes matemáticas de Candy Crush*; Alfredo Marcos: *Cuando la ciencia se separó de la filosofía*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física y Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España